



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Anàlisi estructural i detecció de despreniments rocosos a partir de dades LiDAR a la Muntanya de Montserrat

Treball realitzat per:
Xabier Blanch Górriz

Dirigit per:
Marta Guinau Sellés
Manuel Jesús Royán Cordero

Grau en:
Enginyeria Geològica

Barcelona, 20 de juny de 2016

Grup de recerca RISK NAT
Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà
Facultat de Geologia – UB

TREBALL FINAL DE GRAU

RISK NAT – Grup d’investigació en Riscos Naturals
Institut de Recerca Geomodels
Departament de Dinàmica de la Terra i de l’Oceà
Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona

Anàlisi estructural i detecció de desprendiments rocosos a partir de dades LiDAR a la Muntanya de Montserrat

Treball Final de Grau d’Enginyeria Geològica

realitzat per

Xabier Blanch Górriz

sota la direcció de

Marta Guinau Sellés

Manuel Jesús Royán Cordero

Xabier Blanch Górriz

Barcelona, Juny del 2016

RESUM

El massís de Montserrat és una de les zones turístiques més visitades de Catalunya. Els forts episodis de riscos naturals que s'han anat produint al llarg del temps han malmès en diverses ocasions les infraestructures d'accés així com alguns edificis de serveis. Per aquest motiu el massís sempre ha estat un focus d'atracció per a l'estudi dels riscos geològics amb la intenció de mitigar-ne els efectes i reduir-ne l'exposició.

Des d'aquesta perspectiva en aquest treball es pretén realitzar l'anàlisi dels desprendiments produïts en una zona que encara no ha estat estudiada amb anterioritat i que afecta la carretera que uneix Collbató amb Monistrol de Montserrat.

L'estudi dels desprendiments ens permet calcular-ne els volums i obtenir la relació magnitud freqüència que s'utilitza per caracteritzar l'activitat d'un escarpament. En aquest treball es presenten els resultats dels 30 desprendiments detectats amb volums variables des de $0,0039 \text{ dm}^3$ fins a $14,0 \text{ dm}^3$.

Per altra banda, també és un objectiu d'aquest treball, la realització de l'anàlisi estructural que ens permet caracteritzar el massís, obtenir més coneixement de tot el sistema de fractures que divideix la zona d'estudi i calcular els espaiats que caracteritzen cada família.

Totes aquestes dades, combinades amb les diverses sortides al camp, ens han permès caracteritzar el massís detectant un total de 6 famílies de fractures amb les seves respectives orientacions i cabussaments. A més a més, també s'han obtingut els espaiats i les corbes d'ajust amb les respectives equacions exponencials que caracteritzen cada una de les famílies detectades.

Tots aquests estudis s'han realitzat a partir de les dades LiDAR obtingudes en diversos escanejos realitzats a la zona d'estudi, contribuint a l'ús d'aquest instrument i a la millora de les metodologies emprades. A més a més, en aquest treball també s'ha fet ús de dades fotogramètriques a partir d'un model 3D generat amb la intenció de veure en el futur com es poden compaginar les diferents fonts d'informació.

ABSTRACT

The Mountain of Montserrat is one of the most visited tourist areas of Catalonia. Strong episodes of natural risks that have been produced over time have repeatedly damaged the infrastructures of access and some service buildings. For this reason, the mountain has always been on focus for the study of geological hazards with the intention of mitigating its effects and reduce their exposure.

From this perspective, this paper aims to make an analysis of the rockfalls occurred in an area that has not previously been studied and that can affect the road from *Monistrol de Montserrat* to *Collbató*.

The study of rockfalls allows us to calculate the volumes and reaching the magnitude-frequency relation that is used to characterize the activity of an escarpment. This paper presents the results of the 30 rockfalls detected with variable volumes from 0.0039 dm^3 to 14.0 dm^3 .

On the other hand, the structural analysis enables us to characterize the mountain. Getting more knowledge of the entire system of fractures that divides the study area that allow calculate the discontinuity spacing generated by each family.

All these studies have been made analyzing LiDAR data obtained in several scans taken in the study area. This paper contributes to the use of this instrument and the improvement of the methodologies that have been used. In addition, this paper has also use photogrammetric data from a 3D model generated with the intention to see in the future how to combine different sources of information.

All these data, combined with some observations realized on the escarpment have allowed us to characterize the mountain, detecting a total of six families of fractures with their dips and dip directions. Furthermore, we have obtained the spacing and their adjustment curves with its corresponding exponential equations that characterize all the families detected.

AGRAIMENTS

Vull començar agraint aquest treball a tots els companys que al llarg del camí m'han fet costat. No ha estat un any fàcil per a realitzar un Treball Final de Grau i menys per a realitzar-ne un de l'envergadura i l'ambició com creiem que té aquest.

El primer agraïment va dirigit a la Marta i al Manu per estar al meu costat, resoldre'm tots els dubtes i mirar-se el treball amb la mateixa il·lusió que jo. És un plaer treballar amb ells i saber que els correus electrònics enviats a les tantes de la matinada tindran una resposta l'endemà a primera hora. Els vull agrair que sempre hagin estat collant amb la pressió exacta. La necessària per millorar però no ofegar.

Vull fer extensiu aquest agraïment al David per ajudar-nos amb les qüestions dels programaris, la sortida de camp i per obrir-nos una mica l'òptica quan tots estàvem massa capficats veient les coses sense suficient perspectiva.

Als companys del departament per fer més amenes les visites i acabar parlant de qualsevol cosa menys del treball.

Agrair també a la meva família per ser el tercer treball final d'alguna cosa que han d'aguantar, farts de veure que no paro de fer coses i que em convindria descansar s'encarreguen de no recordar-m'ho massa per no enfadar-nos i s'esforcen per destinar les energies a ajudar-me en el que faci falta.

Vull fer una agraïment especial a l'Eva, perquè malgrat la nostra relació s'hagi transformat radicalment en el transcurs d'aquest treball, durant l'inici em va acompanyar al camp sempre que va fer falta, i al mateix temps, la seva actitud vital és un record constant de que hem de lluitar per allò que volem ser. Costi el que costi.

També vull agrair als companys de GPO, al Francesc i al Roger per permetre'm tota la flexibilitat que he necessitat. No he trobat gens fàcil fer un treball final de grau treballant 8 hores al dia però sempre que he necessitat anar al camp, reunir-me o agafar oxigen m'han permès fer-ho. I per aquesta sort ha estat més fàcil combinar-ho tot.

I finalment, l'últim agraïment és per a tots els companys i amics que en les dificultats sempre han estat al meu costat per fer una petita empenta. Per fer-me veure que sovint ens queixem massa i ensenyar-me que a la vida les dificultats estan per créixer i els reptes per ser més feliç.

ÍNDEX DE CONTINGUTS

ÍNDEX DE FIGURES	iii
ÍNDEX DE TAULES	v
ACRÒNIMS	vii

PART I. INTRODUCCIÓ

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Introducció general	1
1.2. Antecedents	3
1.3. Estructura del treball	4
1.4. Objectius	4
1.5. Despreniments de roques	5
1.6. Famílies de fractures.	7
1.7. Zona d'estudi	7

PART II. METODOLOGIA

2. DETECCIÓ DE DESPRENIMENTS DE ROQUES	11
2.1. Adquisició de dades	11
2.2. Alineació del núvol de punts	12
2.3. Georeferenciació del núvol de punts	14
2.4. Filtratge de la vegetació	15
2.5. Comparació del núvol de punts	16
2.6. Detecció dels despreniments	18
2.7. Càlcul dels volums	19
3. ANÀLISI ESTRUCTURAL DE L'ESCARPAMENT	20
3.1. Adquisició de dades	20
3.2. Regressió Planar	22
3.3. Identificació de Famílies	24
3.4. Model Fotogramètric	25
3.5. Càlcul i distribució d'espaiats	27

PART III. RESULTATS, DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

4. RESULTATS DETECCIÓ DE DESPRENIMENTS	29
4.1. Detecció de despreniments	29
5. RESULTATS ANÀLISI ESTRUCTURAL	32
5.1. Detecció famílies (LiDAR)	32
5.2. Detecció famílies (Dades de Camp)	39
5.3. Comparació LiDAR / Fotogrametria	40
5.4. Càlcul d'espaiats i caracterització de les fractures	41
6. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	46

6.1. Detecció de desprendiments	46
6.2. Detecció de famílies	47
6.3. Comparació LiDAR / Fotogrametria	51
6.4. Càlcul d'espaiats i caracterització de les fractures	52
7. CONCLUSIONS I PERSPECTIVES DE FUTUR	55
7.1. Conclusions	55
7.2. Perspectives de futur	56
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	57

ÍNDIX DE FIGURES

FIGURA I.1 - FILA SUPERIOR – IMATGES DEL RESULTAT DEL FLUX HIPERCONCENTRAT / CORRENT D'ARROSSEGALLS AL BAR DEL MONESTIR I A LA PLAÇADA DEL MONESTIR. FONT HTTP://WWW.ORTAGE.ORG/MONTSERRAT/#PREMSA . FILA INFERIOR – IMATGES DE L'ESLLAVISSADA DE L'ANY 2008. IMATGES EXTRETES DEL BUTLLETÍ DEL SANTUARI.....	2
FIGURA I.2 – ESQUEMA IL·LUSTRATIU DE LES DIFERENTS FASES QUE ES PRODUÏXEN EN UN DESPRENIMENT. EXTRET DE ROYÁN 2015	5
FIGURA I.3 – A) CAIGUDA DE ROQUES (ROCKFALL) B) CAIGUDA DE ROQUES EN DESPLOM (ROCKFALL) C) FLEXURAL TOPPLING D) BLOCK TOPPLING EXTRET DE (COROMINAS & GARCÍA YAGÜE, 1997).....	5
FIGURA I.4 A) MAPA DE SITUACIÓ GENERAL DEL MASSÍS DE MONTSERRAT. B) MAPA GEOREFERENCIAT DE DETALL DE LA ZONA D'ESTUDI. C) FOTOGRAFIA PANORÀMICA DE LA ZONA D'ESTUDI (S'HA DEFORMAT PER CAPTAR TOTA LA ZONA D'ESTUDI. NO S'OBSERVA LA CURVATURA REAL).....	8
FIGURA I.5 - FOTOGRAFIA ACTUAL I FOTOGRAFIA AMB LA SUPERPOSICIÓ DE LES DIFERENTS FÀCIES. S'OBSERVA EL CANVI LATERAL DE FÀCIES DEGUT ALS PROCESSOS SEDIMENTARIS ASSOCIATS A UN FLUX TORRENCIAL. GRAFISME EXTRET DE MARTÍNEZ RIUS, (2006).....	9
FIGURA I.6 - GRAFISME QUE MOSTRA COM LES FRACTURES A 90º ACABEN FORMANT LES AGULLES CARACTERÍSTIQUES DEL RELLEU MONTSERRATÍ. GRAFISME EXTRET D'ALBERT MARTÍNEZ	10
FIGURA II.1 - FLUX DE TREBALL REALITZAT PER OBTENIR ELS DESPRENIMENTS DETECTATS. S'INDICA EL PROGRAMARI EMPRAT EN CADA ETAPA	11
FIGURA II.2 - ZONA D'ESTUDI AMB EL PUNT D'ESTACIONAMENT LIDAR I LES 4 VISUALS CAPTURADES	12
FIGURA II.3 - A) 2 NÚVOLS DE PUNTS EN ELS SISTEMES DE REFERÈNCIA LOCALS (SUPERPOSICIÓ DE NÚVOLS DE PUNTS). B) ALINEACIÓ DELS 4 NÚVOLS DE PUNTS EN UN MATEIX SISTEMA DE REFERÈNCIA	13
FIGURA II.4- A) NÚVOL DE PUNTS OBTINGUT AMB LIDAR AERI DISTRIBUÏT PER L'ICGC (S'HA REALITZAT UNA MALLA PER FACILITAR LA VISUALITZACIÓ). B) NÚVOL DE PUNTS OBTINGUT AMB LIDAR TERRESTRE. C) VISTA FRONTAL DE LA GEOREFERENCIACIÓ. D) VISTA ZENITAL DE LA GEOREFERENCIACIÓ. EN LA FIGURA C I D S'OBSERVA L'AJUST ENTRE ELS DOS NÚVOLS DE PUNTS.	15
FIGURA II.5 - RESULTAT GRÀFIC DE LA CLASSIFICACIÓ.....	16
FIGURA II.6 - COMPARACIÓ ENTRE UN MODEL FOTOGRÀFIC I LA SEVA CORRESPONDÈNCIA EN EL NÚVOL DE PUNTS BINARIS. EN VERMELL ELS PUNTS CORRESPONENTS A LA VEGETACIÓ I EN BLAU ELS PUNTS CORRESPONENTS A LA PARET....	16
FIGURA II.7. A) CERCA DE PUNTS VEÏNS I GENERACIÓ DEL PLA MIG I LA SEVA COMPONENT NORMAL Ni. B) CONSTRUCCIÓ DEL CILINDRE I CÀLCUL DE LA DISTÀNCIA MITJA DELS PUNTS INSCRITS. EXTRETA DE BRODU & LAGUE (2011).....	17
FIGURA II.8 - HISTOGRAMA DEL RESULTAT DE LA COMPARACIÓ ENTRE LES DOS NÚVOLS DE PUNTS D'UNA ZONA QUE ES CONSIDERA SENSE MOVIMENT.....	18

FIGURA II.9— REPRESENTACIÓ DE L'ALGORITME DBSCAN. EN VERMELL I GROC ELS PUNTS QUE COMPLEIXEN LA CONDICIÓN DE $MINPTS = 3$ I $EPS =$ RADI DE LES CIRCUMFERÈNCIES. EN BLAU, EL PUNT QUE QUEDA EXCLÒS DEL CLÚSTER. FONT: WIKIPEDIA - HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DBSCAN	19
FIGURA II.10 - FLUX DE TREBALL REALITZAT PER OBTENIR LES ORIENTACIONS DELS PLANS A PARTIR DE DADES LIDAR ..	20
FIGURA II.11 - DISTRIBUCIÓ DE LES CAPTURES PER MANTENIR LA PERPENDICULARITAT AMB L'ESCARPAMENT. SI NOMÉS ES MOU L'ANGLE DE CAPTURA I NO LA POSICIÓ DE LA CÀMERA NO ES PODEN APLICAR LES EQUACIONS FOTOGRAMÈTRIQUES. MODIFICAT DE AGISOFT PHOTOSCAN (2013)	21
FIGURA II.12 - MAPA DE SITUACIÓ DE LES MESURES REALITZADES AL CAMP.....	22
FIGURA II.13 - PUNTS ELIMINATS. A) PEL FILTRATGE DE LA COL·LINEARITAT. B) PEL FILTRATGE DE LA COPLANARIETAT.	23
FIGURA II.14 - DETALL DE LES ZONES SELECCIONADES PER A REALITZAR LA IDENTIFICACIÓ DE FAMÍLIES.....	24
FIGURA II.15 - IDENTIFICACIÓ DE LES FAMÍLIES SEGONS ELS RANGS D'ORIENTACIÓ I CABUSSAMENT SELECCIONATS. EN VERMELL UNA FAMÍLIA SELECCIONADA.	25
FIGURA II.16 - COMPARATIVA DE LA MATEIXA FOTOGRAFIA AMB I SENSE MÀSCARA.	26
FIGURA II.17 - RESULTAT OBTINGUT A PARTIR DEL MODEL FOTOGRAMÈTRIC.	27
FIGURA III.1 - HISTOGRAMA QUE RELACIONA ELS DESPRENIMENTS AMB LA SEVA FREQUÈNCIA.....	29
FIGURA III.2 - REPRESENTACIÓ ESPACIAL DELS DESPRENIMENTS DETECTATS. DE LA FILA SUPERIOR A LA INFERIOR, PART CENTRAL DE L'AFLOREMENT, PART DRETA DE L'AFLOREMENT I PART ESQUERRA DE L'AFLOREMENT. LA DIMENSIÓ DELS DESPRENIMENTS NO TÉ RELACI.....	30
FIGURA III.3 - RELACIÓ MAGNITUD - FREQUÈNCIA.....	31
FIGURA III.4 - REPRESENTACIÓ SOBRE EL MODEL FOTOGRAMÈTRIC DE LES ZONA D'EXEMPLE PER REPRESENTAR LES FAMÍLIES DETECTADES	32
FIGURA III.5 - IDENTIFICACIÓ DE FAMÍLIES. A L'ESQUERRA MODEL REALITZAT AMB LIDAR, A LA DRETA MODEL REALITZAT AMB FOTOGRAMETRIA. S'HA RESPECTAT EL CODI DE COLORS.....	41
FIGURA III.6 — ESQUERRA: PLANS SELECCIONATS PER A CALCULAR ELS ESPAIATS. DRETA: PLANS SENSE FILTRAR	45
FIGURA III.7 - COMPARATIVA ENTRE LES DADES DE CAMP I LES DADES LIDAR.....	48
FIGURA III.8 - CANVI DE CABUSSAMENT ENTRE L'AGRUPACIÓ 2A I L'AGRUPACIÓ 4A.....	50

ÍNDIX DE TAULES

TAULA II.1 - NÚMERO DE PUNTS DE CADA NÚVOL DE PUNTS.....	12
TAULA II.2- RESULTAT DE LA CLASSIFICACIÓ EN LES ZONES DE MOSTRA SELECCIONADES.....	16
TAULA II.3 - RELACIÓ DELS PUNTS ROCOSOS I DE VEGETACIÓ DESPRÉS D'APLICAR L'ALGORITME CANUPO ALS NÚVOLS DE PUNTS.....	16
TAULA II.4 – VALORS UTILITATS DE COLINEARITAT I COPLANARIETAT.....	23
TAULA III.1 - RELACIÓ ENTRE ELS DESPRENIMENTS DETECTATS I EL VOLUM	29
TAULA III.2 - ORIENTACIÓ I CABUSSAMENT I NÚMERO DE PUNTS DELS PLANS DETECTATS.....	39
TAULA III.3 - ORIENTACIÓ I CABUSSAMENT DE LES FAMÍLIES DETECTADES MITJANÇANT EL MODEL FOTOGRAMÈTRIC.....	41
TAULA III.4 - ESPAIATS MÍNIMS I MÀXIM DE LES FRACTURES.....	45
TAULA III.5 - COMPARACIÓ ENTRE LES FAMÍLIES OBTINGUDES I LES FAMÍLIES EXISTENTS EN LA BIBLIOGRAFIA.....	47

LiDAR: Light Detection and Ranging

ALS: Airbone Laser Scanner

TLS: Terrestrial Laser Scanner

ICP: Iterative Closest Point

ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

RMS: Root Mean Square

CANUPO: CAractérisation de NUages de POints

PCA: Principal Component Analysis

DBSCAN: Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

MinPts: DBSCAN, nombre mínim de punts que ha de tenir una agrupació.

Eps: DBSCAN, distància màxima al voltant de cada punt on es cercaran els punts.

SEFL: Surface Extraction From LiDAR

VAPS: Valors propis

VEPS: Vectors propis

PART I. INTRODUCCIÓ

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Introducció general

Aquest treball presenta un estudi realitzat a una part del massís rocós de Montserrat on mitjançant dades LiDAR i fotogramètriques s'ha realitzat la detecció de desprendiments i la caracterització dels plans que fracturen la paret rocosa en aquesta localització.

El massís de Montserrat està situat a la Catalunya central, formant part de la serralada prelitoral catalana, i genera un relleu genuí i característic que el fa fàcilment identificable des de qualsevol punt de vista. El seu punt més alt correspon a Sant Jeroni (1.236 m). Degut a la seva proximitat amb Barcelona, al seu relleu característic i la sacralització del massís (tenint com a màxim referent el Santuari de Montserrat) s'ha convertit amb una icona cultural per a molts habitants.

Per tots aquests motius Montserrat s'ha convertit en un dels pocs llocs turístics de Catalunya que rep de manera habitual més de 2 milions de visitants a l'any, mentre que per altra banda, s'estima que aproximadament unes 800.000 persones a l'any fan un ús recreatiu del parc.

Tots aquests usos de la muntanya, però, han de conviure amb diversos processos naturals que de manera permanent afecten el massís com per exemple desprendiments de roca, esllavissades o corrents d'arrossegalls (en discussió) (Copons, 2008). Malgrat les magnituds d'aquests episodis són molt variables, en els darrers anys s'han desencadenat processos significativament rellevants que han implicat quantioses destrosses i danys.

Casos com l'aiguat de juny del 2000 on es van produir més de 200 esllavissades i es va produir un gran flux hiperconcentrat - corrent d'arrossegalls (Copons, 2008) que va destrossar part de les instal·lacions del Monestir (Figura I.1), o com els desprendiments de final d'any del 2008 on van quedar tallats durant mesos tots els accessos al Monestir excepte l'aeri (Lopez i Camps, 2009) (Figura I.1), demostren la severitat dels efectes que produeixen aquests episodis i justifiquen la necessitat d'investigar, caracteritzar i quantificar els riscos geològics que es produeixen.

Una de les eines que al llarg de la darrera dècada s'ha estat emprant per a les investigacions dels moviments de massa són els núvols de punts obtinguts mitjançant LiDAR (*Light Detection And Ranging*). L'obtenció d'aquestes dades es pot realitzar des de mitjans aerotransportats coneguts com a ALS (Airbone Laser Scanning) o bé des de la superfície terrestre mitjançant sensors TLS

(Terrestrial Laser Scanning). Degut a que els sensors TLS permeten obtenir dades molt més detallades de les zones amb una orientació predominantment vertical i que permeten situar el sensor a distàncies molt més pròximes a les zones a estudiar (obtenint núvols de punts més densos i precisos) ha acabat sent l'aparell que predominant en l'estudi de moviments de massa en escarpaments i parets rocoses així com en els estudis on es realitzen caracteritzacions de fractures.



Figura I.1 - Fila superior – Imatges del resultat del flux hiperconcentrat / corrent d'arrossegalls al bar del Monestir i a la plaçada del Monestir. Font <http://www.oratge.org/Montserrat/#premsa>. | Fila inferior – imatges de l'esllavissada de l'any 2008. Imatges extretes del Butlletí del Santuari

L'obtenció de núvols de punts també es pot realitzar amb altres instruments. Per aquest treball també s'ha considerat obtenir-los a partir d'un model fotogramètric de la zona. Els models fotogramètrics atorguen una major agilitat i una menor inversió econòmica respecte el LiDAR però per contra no atorguen la precisió i la fiabilitat de les dades obtingudes amb el làser. Per aquest motiu en aquest treball només es farà servir les dades provinents del model fotogramètric per a la caracterització estructural.

Amb la voluntat de millorar les metodologies existents i de fer un pas més en la caracterització del massís de Montserrat s'obtenen els resultats que es presenten en aquest treball, responent a la necessitat última d'entendre millor el nostre entorn per facilitar la convivència entre el medi natural i la societat.

1.2. Antecedents

Els fluxos de treball que s'utilitzen en aquest estudi parteixen de metodologies utilitzades i consolidades anteriorment per altres autors. Tot i així, en els dos processos d'aquest treball s'han modificat les metodologies existents amb la voluntat d'obtenir millors resultats.

La detecció de desprendiments a partir de la comparació de dos núvols de punts obtinguts mitjançant LiDAR ha estat àmpliament utilitzada i recollida en diferents articles, sent dues revisions d'aquests, les elaborades per Jaboyedoff, et al. (2010) i Abellán, et al. (2014).

En especial, són rellevants per la proximitat i la metodologia emprada els estudis realitzats a la zona pilot de Puigcercós (Pallars Jussà) com els d'Abellán, et al. (2010), Royán, et al. (2014), Royán, et al. (2015) i Blanch (2015).

L'estudi de desprendiments al massís de Montserrat també compta amb un seguit de treballs acadèmics realitzats amb anterioritat com per exemple el treball final de carrera de Gal·la Requena (2010) on s'analitzen les zones de sortida de desprendiments a la paret de Degotalls. Per a l'elaboració del present treball, té especial valor l'estudi realitzat en la tesi doctoral defensada per Royán (2015) en la qual s'apliquen part de les metodologies discutides en diferents parets rocoses del massís de Montserrat.

Les caracteritzacions estructurals dels massissos mitjançant dades LiDAR també han estat àmpliament tractades en altres treballs d'investigació com Gigli & Casagli (2011) on es realitzen anàlisis estructurals semiautomàtics a partir de dades LiDAR, Fisher, et al. (2014), el qual fa una comparació entre les dades obtingudes amb LiDAR i els mètodes tradicionals o Riquelme, et al., (2014) més centrat en la identificació dels plans a partir de les dades LiDAR.

Pel que fa a l'aplicació directe de metodologia emprada en aquest treball destacada l'article realitzat per García-Sellés, et al. (2011) on desenvolupa la metodologia i el programari utilitzat, i l'anàlisi realitzat per Santana, et al. (2012) on aplica el flux de treball per obtenir-ne resultats. També té una especial rellevància com a antecedent a aquest treball l'estudi realitzat per Royán, et al. (2013) on identifica els plans de fracturació de les parets rocoses del Monestir de Montserrat.

L'espaiat entre les discontinuïtats també ha estat un tema tractat amb anterioritat com es desprèn de l'estudi realitzat per Riquelme, et al. (2015) on es realitza un anàlisi de les discontinuïtats en massissos rocosos a partir de núvols de punt.

Finalment dins d'aquest apartat d'antecedents resulta d'especial interès citar el treball realitzat per Alsaker, et al. (1996) ja que és considerat l'anàlisi estructural més important realitzat al massís de Montserrat.

1.3. Estructura del treball

El treball que es presenta està dividit entres grans blocs.

1. Introducció
2. Metodologia
3. Resultats, discussió i conclusions

El primer bloc correspon a la introducció general al treball. Aquesta part contextualitza el treball i mostra tot els elements necessaris per a comprendre la metodologia i els resultats. És la part on es troben els antecedents, els objectius o la descripció de les zones d'estudi entre altres.

La segona part correspon a la metodologia i és on s'exposen tots els processos que s'han realitzat per aconseguir tots els objectius. S'expliquen en detall els procediments, els paràmetres i totes les singularitats que s'han dut a terme per obtenir els resultats finals.

La tercera i última part d'aquest treball correspon a l'exposició dels resultats, la discussió i les conclusions finals. En aquesta part es du a terme una exposició de tots els resultats obtinguts i una posterior discussió tant dels resultats com de la metodologia emprada. Per últim s'han redactat les conclusions i possibles futurs treballs.

La voluntat de dividir el treball en tres parts ben diferenciades pretén facilitar al lector la comprensió i l'anàlisi dels resultats obtinguts i de tota la feina realitzada.

1.4. Objectius

L'estudi que es presenta a continuació té dos objectius principals que es concreten en:

1. Detectar els desprendiments ocorreguts a la zona d'estudi durant el període d'observació.
2. Analitzar les diferents famílies de fractures que afecten la zona d'estudi.

Aquests objectius generals es poden dividir en els següents objectius específics:

- 1.a Obtenir la relació magnitud-freqüència dels desprendiments detectats.

- 1.b Millora dels mètodes emprats amb anterioritat per detectar desprendiments de petites dimensions.
- 2.a Calcular l'espaiat de les fractures detectades.
- 2.b Caracteritzar les fractures a partir de la corba d'ajust als espaiats detectats.
- 2.c Comparar la metodologia emprada per a l'anàlisi de discontinuïtats amb dades LiDAR i dades fotogramètriques.

1.5. Desprendiments de roques

Com es desprèn de l'apartat anterior, un dels objectius d'aquest treball és detectar els desprendiments que es produeixen a la zona d'estudi. Els desprendiments de roques són uns fenòmens extremadament ràpids que es donen en parets rocoses gairebé verticals on una massa rocosa cau lliurement (zona de sortida) podent-se fragmentar en trossos més petits (zona de trajecte) i s'acaba acumulant aturant formant acumulacions a les zones d'arribada (Figura I.2).

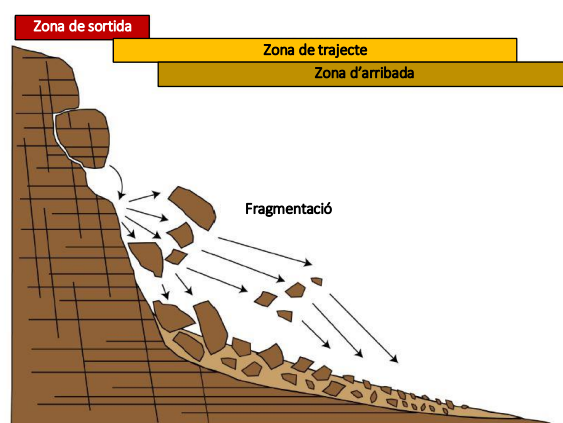


Figura I.2 – Esquema il·lustratiu de les diferents fases que es produeixen en un desprendiment. Modificat de Royán (2015)

Les caigudes de blocs rocosos poden estar condicionades per diferents mecanismes. Els mecanismes que més caracteritzen els desprendiments a la muntanya de Montserrat són per una banda la caiguda de roques (*rock falls*) i per l'altre la bolcada (*rock topples*) (Varnes, 1978) (Figura I.3). Les caigudes de roques estan caracteritzades per ser moviments espontanis que mobilitzen blocs de roca que es separen de la paret a partir de discontinuïtats tals com fractures, plans d'estratificació o juntes. En canvi, els *rock topples* es produeixen per un component rotacional en direcció del vessant que acaba desencadenant un desprendiment d'una columna o placa de material també al llarg d'una discontinuïtat. (Varnes, 1978)

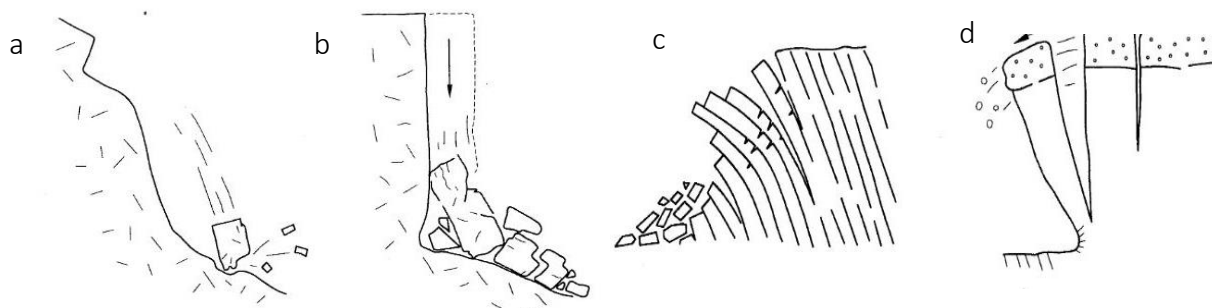


Figura I.3 – a) caiguda de roques (rockfall) b) caiguda de roques en desplom (rockfall) c) flexural toppling d) block toppling / Extret de (Corominas & García Yagüe, 1997)

Aquest darrer tipus de moviment es pot classificar com a *block toppling* o *flexural toppling* (Figura I.3). Els primers corresponen a aquells processos que estan ben definits per discontinuïtats basals, on la roca és relativament massiva. Aquest tipus de moviment poden començar a produint-se molt lentament però en estats propers a la caiguda la seva deformació s'accelera (Hung, et al., 2014). Els moviments de tipus *flexural toppling* es caracteritzen per tenir uns espais molt petits, associats a deformacions molt lentes que tendeixen a autoestabilitzar-se, es produeixen a gran escala en materials relativament febles i fissibles i no estan associats a cap pla de discontinuïtat basal. (Hung, et al., 2014)

Per la morfologia observada en la zona d'estudi es considera que majoritàriament els despreniments que es troben són caigudes de blocs rocosos del tipus *rock falls* tot i que s'observen processos actius de *rock topples* – *block toppling* en determinades zones del massís (Janeras, et al., 2015).

L'energia d'aquests despreniments va directament lligada al volum després i a l'alçada des d'on es produeixen. Els mecanismes que desencadenen aquests processos són molt variats però a part dels climàtics se'n poden destacar, especialment per la zona d'estudi, els despreniments per descalçament. Aquest descalçament pot produir-se per l'erosió del material tou a la base del bloc rocós, per una soscavació causada pels torrents de la zona o bé directament perquè el bloc rocós llisca sobre la superfície basal.

Depenent del volum, els episodis de despreniments de roques a Montserrat es poden dividir en (ICGC, 2011):

- Caiguda còdols i agregats (volums petits i associats a la meteorització dels conglomerats)
- Caiguda de crostes o blocs (volums mitjans associats a l'alteració del conglomerat)
- Caiguda de masses singulars (de major escala, delimitades per discontinuïtats)

Els principals indicadors d'activitat precedent associats als despreniments que es poden observar en la zona d'estudi són (Copons, 2008):

- Fragment dels blocs despresos.
- Nínxols de sortida
- Impactes en les infraestructures (asfalt colpejat, barreres de protecció colpejades...)

1.6. Famílies de fractures.

La concepció d'un massís rocós homogeni i compacte és una idealització utilitzada sovint per a simplificar els càlculs en l'àmbit de l'enginyeria i facilitar la interpretació dels resultats obtinguts. No obstant, l'observació al detall de qualsevol massís rocós comporta la identificació de fractures.

La fracturació és un recurs vital per a entendre els processos que han actuat en un massís ja que són un reservori de memòria dels diferents estats tensionals que han actuat sobre el conjunt d'aquest.

La fracturació, idealment, està controlada per plans paral·lels amb el mateix cabussament que es distribueixen de manera més o menys constant al llarg del massís sempre i quan aquest sigui homogeni, és a dir, tingui les mateixes característiques i propietats arreu. Tot el conjunt de plans paral·lels distribuïts de manera homogènia conformen una família de fracturació. Per aquest motiu les famílies de fracturació es defineixen per l'angle de la direcció del pla de cabussament i pel cabussament.

La fracturació afecta directament a les propietats d'un massís i la caracterització d'aquestes és de vital importància tant per a corregir tots els paràmetres enginyerils que s'obtenen a partir de l'assaig d'una mostra individual de roca com per entendre el comportament geològic del massís. Per exemple l'estat tensional actual o la circulació de fluids. També per caracteritzar els mecanismes de mobilització i les dimensions dels blocs despresos i en conseqüència les energies d'impacte que són un element indispensable per al disseny d'obres de defensa.

L'estudi de les fractures es realitza principalment per la seva expressió en superfície i s'avaluen paràmetres com la longitud d'aquestes, l'espaiat, l'obertura i el reblert.

Depenent de les orientacions i els cabussaments de les diferents famílies de fractures l'estabilitat del massís es pot veure afectada generant blocs i falques potencials de ser despreses no només en l'àmbit del risc natural com desprendiments sinó en l'àmbit de la construcció com ara en l'excavació de talussos o de túnels.

1.7. Zona d'estudi

Situació geogràfica

La zona d'estudi d'aquest treball es situa a la muntanya de Montserrat, concretament a la zona sud-est del massís (Figura I.4.a) i (Figura I.4.b). L'aflorament escollit correspon a l'escarpament que es troba al Clot d'en Casanelles, a la seva intersecció amb la carretera B-112 que uneix les poblacions

de Collbató i Monistrol de Montserrat. Aquest escarpament vertical té el seu punt més baix a cota 300 m i el seu punt més alt aproximadament als 390 m. (Figura I.4.b)

L'accés a la zona d'estudi es pot realitzar per la mateixa carretera. L'aflorament es situa aproximadament al punt quilomètric 3,5 i s'accedeix remuntant el talús de la carretera tot superant les xarxes de protecció.

La mobilitat per la zona d'estudi és molt complicada degut a que la zona presenta molts blocs caiguts i està àmpliament coberta per matolls. L'encaixament del torrent al peu del talús impedeix creuar fàcilment la zona d'estudi. Aquestes característiques fan impossible l'accés al peu de l'aflorament per tal de realitzar l'observació directa de la paret rocosa (Figura I.4.c).

Aquestes dificultats per accedir i transitar per la zona han fet que l'estacionament de l'aparell LiDAR s'hagi hagut de realitzar des d'una certa distància per obtenir una perspectiva més completa de la zona d'estudi. Concretament, des d'un bloc, situat a l'altre marge de la carretera. I també ha comportat que les dades de camp s'hagin hagut de prendre en altres afloraments pels quals hi transitava algun camí.

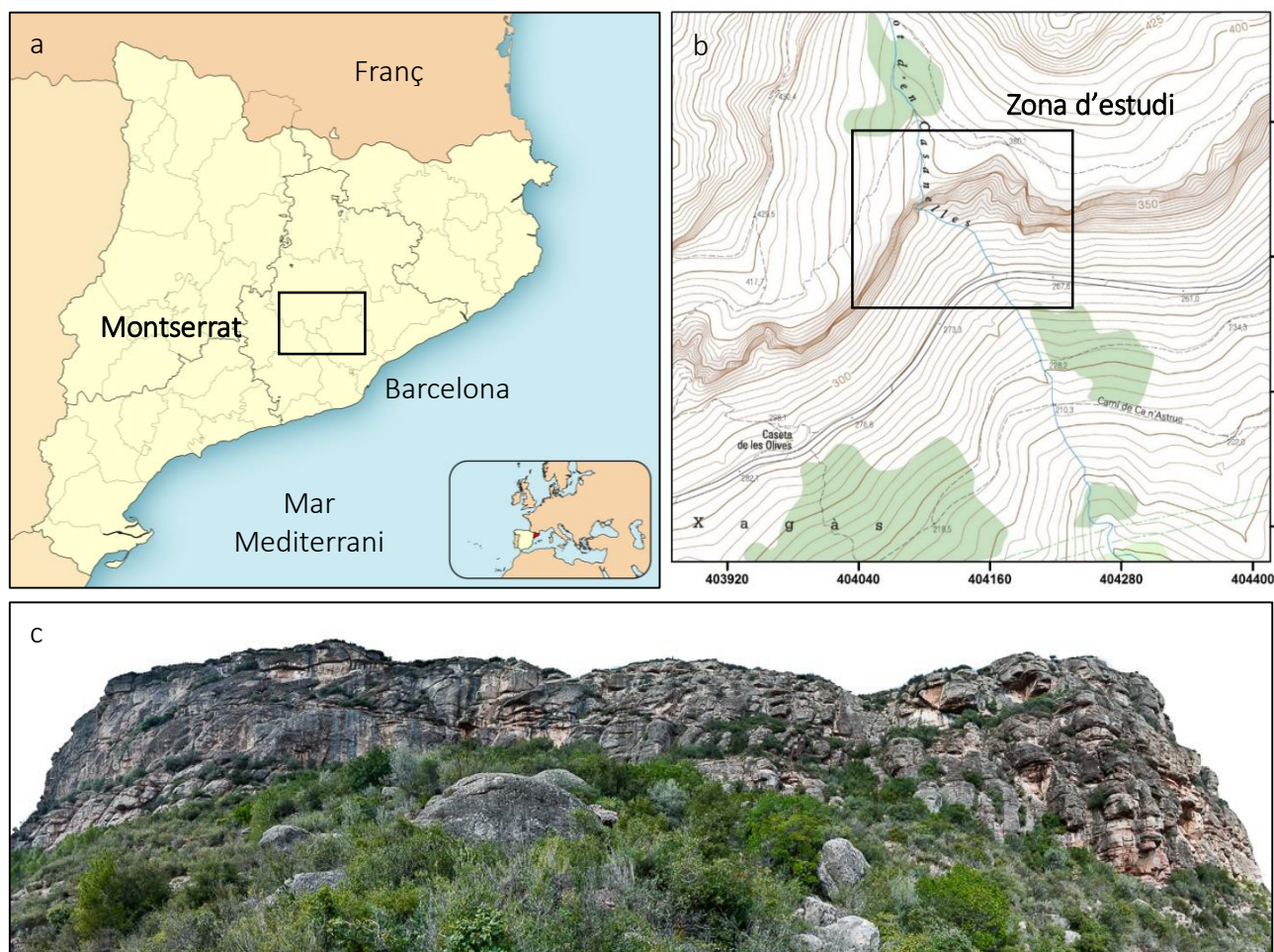


Figura I.4 a) Mapa de situació general del massís de Montserrat. b) Mapa georeferenciat de detall de la zona d'estudi. c) Fotografia panoràmica de la zona d'estudi (s'ha deformat per captar tota la zona d'estudi. No s'observa la curvatura real)

Context geològic

El context geològic de la muntanya de Montserrat ha estat àmpliament estudiat i descrit en estudis tals com Anadón & Marzo (1975), Alsaker, et al. (1996) o López-Blanco (2006). Per als objectius i les limitacions d'aquest treball es resumeix la història geològica fent èmfasi en les característiques més importants.

Els materials que conformen el massís de Montserrat són conglomerats paleògens de la Depressió Central Catalana que van sedimentar-se a la vora del que ara coneixem com la conca de l'Ebre. Aquests materials provinents de serralades aixecades situades a l'actual costa Catalana s'anaven dipositant formant un conjunt de ventalls costaners (fan delta).

Aquests ventalls al·luvials o costaners dipositaven durant el terciari (eocè inferior) el material segons l'energia del torrent, sedimentant els còdols més grossos a l'àpex del ventall i dipositant en les posicions més distals els materials de granulometria més fina. Aquest fet, combinat amb els diferents règims energètics dels torrents (no tenen una activitat estable i constant) va dipositar els materials generant els canvis laterals de fàcies que ara observem (Figura 1.5).

L'activitat extensiva viscuda durant l'eocè/oligocè, així com l'erosió i diverses falles que van permetre individualitzar el massís van anar conformant el relleu i posant en rellevància els ventalls costaners que anys enrere havien estat sedimentant el material provinent de les antigues serralades costaneres.

Els esforços estructurals que va patir el massís el van diaclassar conformant famílies de fractures que travessen tot el massís de nord a sud i d'est a oest. Aquesta configuració gairebé a 90º ha donat

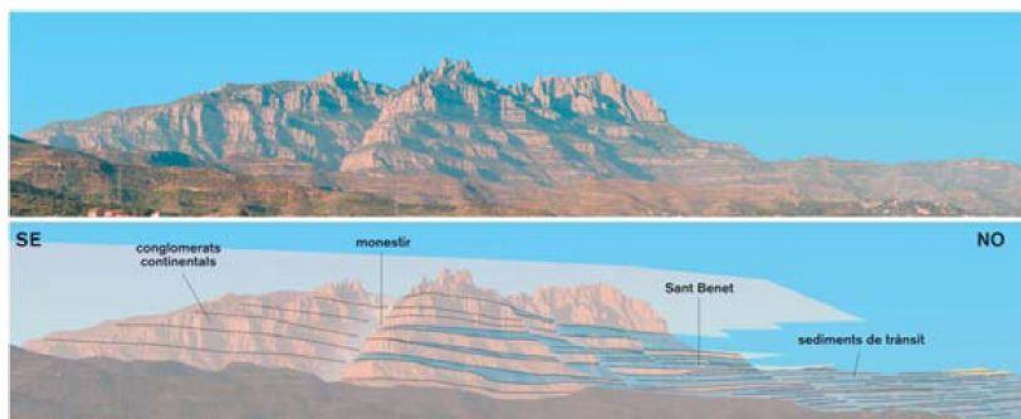


Figura 1.5 - Fotografia actual i fotografia amb la superposició de les diferents fàcies. S'observa el canvi lateral de fàcies degut als processos sedimentaris associats a un flux torrencial. Grafisme extret de Martínez Rius, (2006).

a la muntanya el seu relleu genuí, ja que al llarg dels anys, els processos d'infiltració i erosió per aquestes fractures han anat conformant les famoses agulles que el caracteritzen (Figura I.6).

En la zona d'estudi, l'escarpament vertical està conformat per dos paquets de material conglomeràtic que es situen entre dos paquets de material de granulometria més fina. Els paquets de conglomerats corresponen a la part vertical de l'escarpament mentre que les zones amb menys pendent, el talús d'aproximació i el talús que comença on s'acaba l'escarpament corresponen als materials sedimentaris més fins.

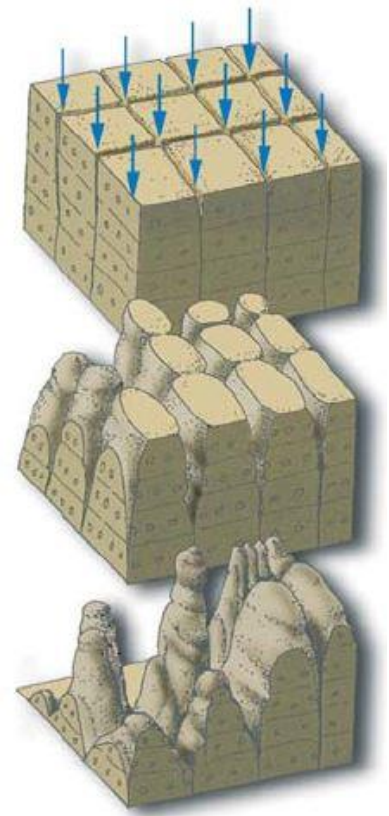


Figura I.6 - Grafisme que mostra com les fractures a 90° acaben formant les agulles característiques del relleu montserratí. Grafisme extret d'Albert Martínez

PART II. METODOLOGIA

2. DETECCIÓ DE DESPRENIMENTS DE ROQUES

La metodologia que s'ha emprat per a realitzar la detecció de desprendiments és la que es pot veure resumida en la Figura II.1 i que s'explica en els propers apartats. Aquesta flux de treball es basa en una modificació de la metodologia que s'ha emprat amb èxit en anteriors treballs com per exemple Royán (2015) o Blanch (2015).



Figura II.1 - Flux de treball realitzat per obtenir els desprendiments detectats. S'indica el programari emprat en cada etapa

2.1. Adquisició de dades

L'obtenció dels núvols de punts utilitzats en aquest treball s'ha realitzat mitjançant un aparell LiDAR terrestre. En aquests sistemes el càlcul dels punts es realitza a partir de la posició interna dels miralls i del temps de vol del raig làser des de que surt de l'aparell fins que hi retorna després d'haver rebotat en la superfície escanejada (Petrie Toth, 2008). Amb aquestes dades, es poden obtenir les tres coordenades de tots els punts que conformen el núvol de punts de la zona escanejada. A més a més, també s'emmagatzema la intensitat, que correspon a l'energia amb la que retorna el raig làser a l'aparell. Aquesta depèn de la distància, l'atmosfera i el material on el raig de llum rebota.

Per a aquest treball concret l'adquisició de dades s'ha realitzat mitjançant un TLS ILRIS-3D de la companyia *Optech*. Aquest aparell consta d'un dispositiu que actua d'emissor i receptor d'un raig làser d'ona infraroja i un sistema interior de miralls que li permet fer l'escombrat de la paret. De les especificacions tècniques de l'aparell s'extreu que pot assolir una precisió de 7 mil·límetres quan s'escaneja a una distància de 100 metres. En aquest model les velocitats de captura poden arribar als 2500 punts per segon.

Per tal de cobrir l'àrea d'estudi es realitzen 4 escanejos amb una superposició del 35% (Figura II.12). En condicions ideals és desitjable estacionar el LiDAR en posicions diferents per tal d'obtenir visuals amb perspectives diferents. Aquest fet permet a l'hora de processar les dades realitzar una superposició i evitar les zones d'ombra. Donades les circumstàncies de la zona d'estudi per a aquest treball no s'ha pogut variar l'estacionament, obtenint totes les dades des del mateix punt. (Figura II.2)

Degut a la configuració triada l'espaiat entre els punts que conformen el núvol de punts està situat entre 4 i 6 cm. Els números de punts que conformen cada núvol i la densitat mitja obtinguda es mostra a la Taula II.1.

Taula II.1 - Número de punts de cada núvol de punts

	Juliol 2015	Desembre 2015
Punts totals	9.119.881	9.411.878
Densitat mitja	350 punts/m ²	385 punts/m ²

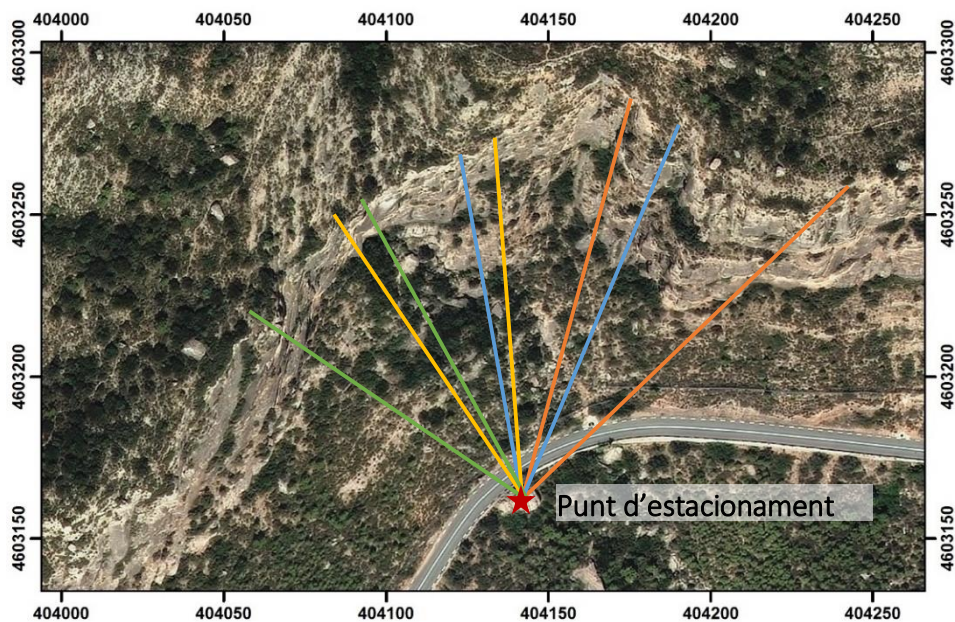


Figura II.2 - Zona d'estudi amb el punt d'estacionament LiDAR i les 4 visuals capturades

Per aquest estudi s'han fet servir 2 captures de dades. La primera captura correspon al dia 7 de juliol del 2015 i la segona correspon al dia 4 de desembre del 2015. Essent l'espaiat entre captures de 150 dies.

2.2. Alineació del núvol de punts

Al no tenir les coordenades de l'estacionament la captura de dades s'obté en un sistema de referència local on la coordenada origen (0,0,0) es troba en el sensor situat en el centre de l'aparell.

Degut al fet que les captures no estaven georeferenciades (no es tenen les coordenades GPS del punt d'estacionament) s'ha hagut de realitzar l'alineació dels 8 núvols de punts obtinguts (4 núvols

de punts per cada captura de dades). Donat que cada núvol de punts té un sistema de referència local és necessari realitzar una primera alineació entre els núvols de punts, per tal de situar-los de manera coherent en un mateix sistema de referència. Per a realitzar aquesta tasca s'ha fet servir el mòdul IMInspect del programari Polyworks (InnovMetrics).

El procediment d'alineació s'ha desenvolupat seguint la següent seqüència:

- a) es selecciona un núvol de punts que serà el de referència [P1].
- b) es seleccionen els núvols de punts restants [P2, P3 i P4] com a dades alineables.
- c) s'alinea [P2, P3 i P4] respecte [P1].

Aquesta alineació es du a terme en dues etapes. Primerament es realitza una alineació per assignació de punts homòlegs que serveix per obtenir una primera aproximació dels núvols de punts. En aquest procediment es seleccionen un mínim de tres punts homòlegs a cada núvol de punts i el programari realitza la transformació rígida que minimitza l'error en els punts d'alineació.

Un cop les dades estan més o menys alineades pel mètode anterior es refina l'alineació obtenint la matriu de transformació final aplicant l'algoritme iteratiu de punts propers ICP (*Iterative Closest Point*) (Chen & Medioni, 1992). Aquest algoritme aconseguix atorgar a tots els punts les coordenades que fan mínima la distància entre els dos núvols de punts.

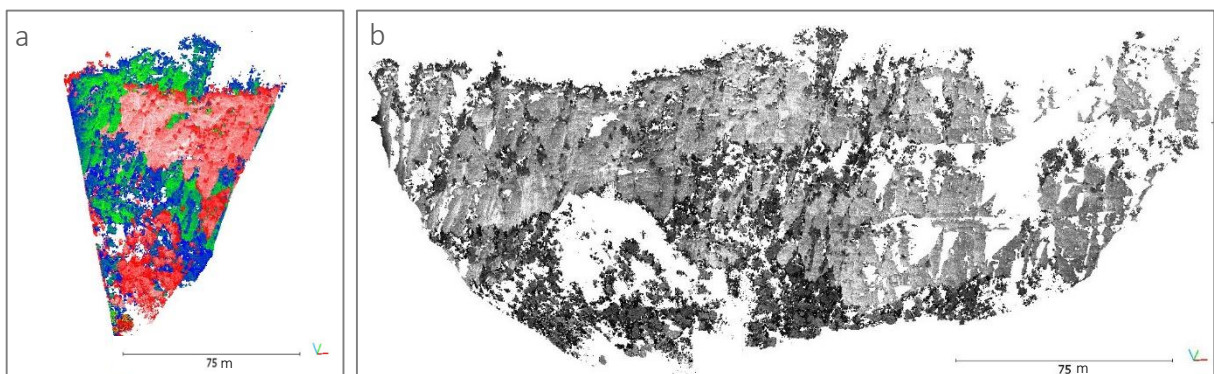


Figura II.3 - a) 2 núvols de punts en els sistemes de referència locals (superposició de núvols de punts). b) Alineació dels 4 núvols de punts en un mateix sistema de referència

Un cop s'ha realitzat l'alineació dels 4 núvols de punts (Figura II.3) que s'obtenen en cada captura de dades cal realitzar l'alineació entre les dues captures de dades. És a dir, cal alinear els núvols de punts del desembre del 2015 respecte els núvols de punts obtinguts el juliol de 2015.

El procediment d'alineació que s'utilitza és similar al comentat anteriorment:

- a) es seleccionen els núvols de punts que serviran de referència [Juliol 2015].
- b) es seleccionen els núvols de punts de [Desembre 2015] com a dades alineables.

- c) s'alineia [Desembre 2015] respecte [Juliol 2015].

Com que al llarg dels 150 dies que s'han succeït entre les captures de dades ha canviat la vegetació i s'han pogut produir despreniments cal seleccionar una àrea d'interès eliminant la vegetació i el peu de l'escarpament per facilitar l'alineació i evitar errors. A més al llarg del procés iteratiu d'alineació ICP s'ha anat ignorant totes les àrees que podien estar subjectes a canvi per tal de permetre al programari aplicar l'algoritme ICP només en aquelles àrees que no han patit cap modificació al llarg dels 150 dies.

2.3. Georeferenciació del núvol de punts

Donat que no es disposa del posicionament de l'aparell en el moment de realitzar la captura de dades i que necessitem obtenir el núvol de punts en coordenades geogràfiques per a poder aplicar les metodologies d'anàlisi de discontinuïtats s'ha hagut de realitzar una georeferenciació. La georeferenciació de les dades s'ha realitzat a partir de l'alineació entre els núvols de punts obtinguts i el núvol de punts de LiDAR aeri que distribueix l'ICGC georeferenciat en el sistema de coordenades ETRS 89 fus 31N. Aquest procés s'ha realitzat aplicant la metodologia ja esmentada anteriorment:

- a) es seleccionen els núvols de punts que serviran de referència [ICGC].
- b) es seleccionen els núvols de punts de [Juliol i Desembre 2015] com a dades georeferenciables.
- c) s'alineia [Juliol i Desembre 2015] respecte [ICGC].

En aquest cas s'ha emprat el programari CloudCompare V2 degut a la facilitat per obrir i executar el fitxer en format .LAS que distribueix l'ICGC. Tot i així, el procediment aplicat per alinear (c) és exactament el mateix que l'explicat en apartats anteriors (Figura II.4). Primerament, es realitza una identificació de punts homòlegs per apropar els núvols de punts i finalment s'aplica l'algoritme ICP per minimitzar la distància entre els núvols de punts.

Aquest procediment permet obtenir una georeferenciació aproximada ja que al emprar dades d'un LiDAR terrestre (on predomina la vertical) i dades d'un LiDAR aeri (on predomina la horitzontal) amb resolucions molt diferents els punts en comú es redueixen limitant l'eficàcia del algoritme ICP. En aquest cas s'ha obtingut un valor quadràtic mig RMS (*Root Mean Square*) de 0,40. Tot i així el posicionament obtingut per al núvol de punts és acceptable per a l'anàlisi posterior.

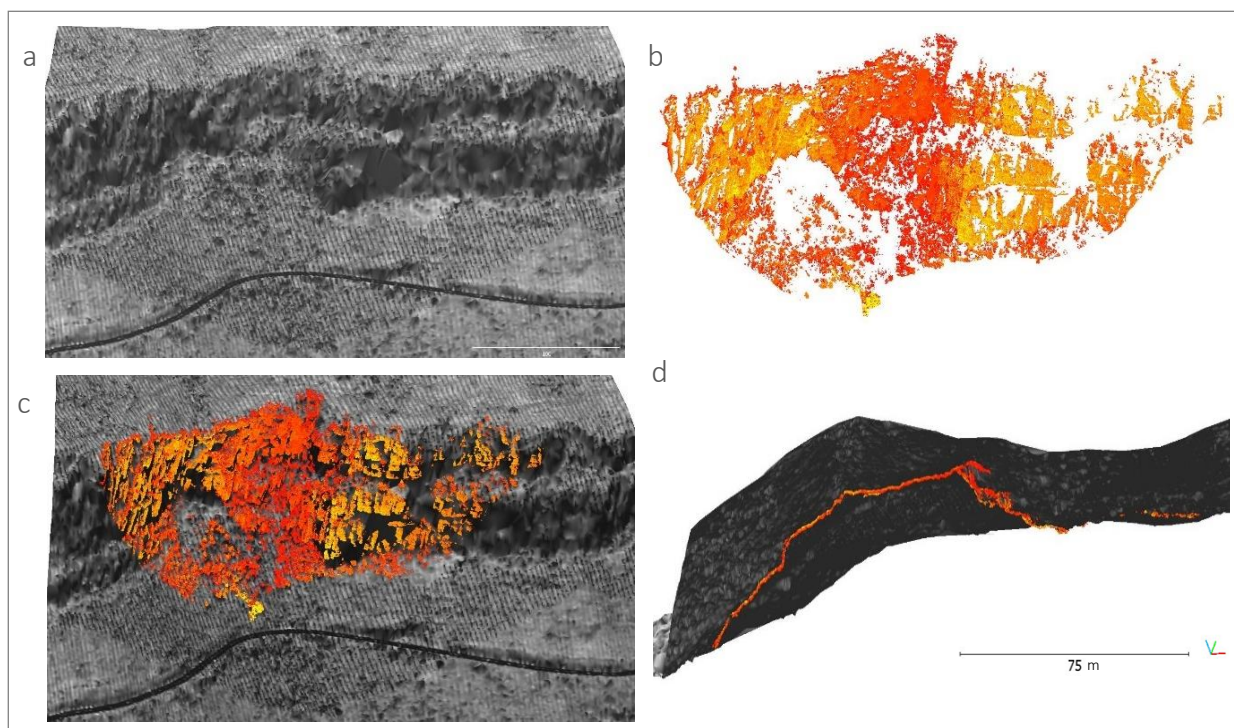


Figura II.4- a) Núvol de punts obtingut amb LiDAR aerí distribuït per l'ICGC (s'ha realitzat una malla per facilitar la visualització). b) Núvol de punts obtingut amb LiDAR terrestre. c) Vista frontal de la georeferenciació. d) Vista zenital de la georeferenciació. En la figura c i d s'observa l'ajust entre els dos núvols de punts.

2.4. Filtratge de la vegetació

Per tal de facilitar els posteriors processos, agilitzar els temps de càlcul, reduir el pes dels fitxers i evitar errors en la comparació que es realitzarà entre els núvols de punts s'ha procedit a aplicar un algoritme d'eliminació de vegetació. Aquest algoritme anomenat CANUPO (*CARactérisation de NUages de POints*) (Brodu & Lague, 2011) és un algoritme de classificació de punts segons la geometria que defineixen els punts veïns. La classificació es realitza de la següent manera:

- Es seleccionen manualment punts que es consideren vegetació i punts que es consideren roca per a obtenir les "signatures" que permetran fer la classificació a tot el núvol de punts.
- Es selecciona un conjunt de radis que serviran per buscar els punts veïns del punt analitzat.
- S'analitza la geometria que conforma el punt estudiat amb els punts veïns inscrits en els diferents radis seleccionats realitzant un anàlisi PCA (*Principal Component Analysis*).
- De l'anàlisi anterior s'obté com a resultat els valors propis que defineixen la geometria del conjunt de punts seleccionats, obtenint uns valors propis pels punts que conformen la vegetació i uns altres pels punts que conformen la paret rocosa.
- S'efectua la classificació sobre les mostres seleccionades en l'apartat (a) per avaluar les signatures (Taula II.2 i Figura II.6)

Taula II.2- Resultat de la classificació en les zones de mostra

	<i>Paret Rocosa</i>	<i>Vegetació</i>
<i>Punts analitzats</i>	100.000	100.000
<i>Classificats Correctament</i>	96.476	96.301
<i>Percentatge</i>	96.5 %	96.3 %

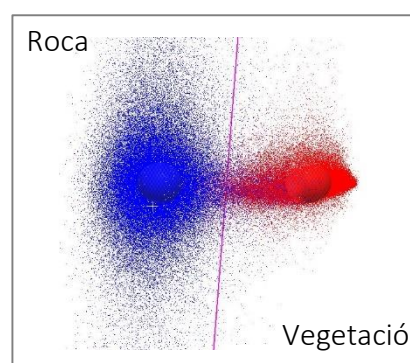


Figura II.6 - Resultat gràfic de la classificació

- f) Després d’obtenir les “signatures” i verificar-les (apartat e) s’aplica l’algoritme al conjunt de tot el núvol de punts, obtenint com a resultat un núvol de punts binari on el valor 1 correspon a la classificació de les zones rocoses i el valor 2 a les zones de vegetació. (Figura II.5)

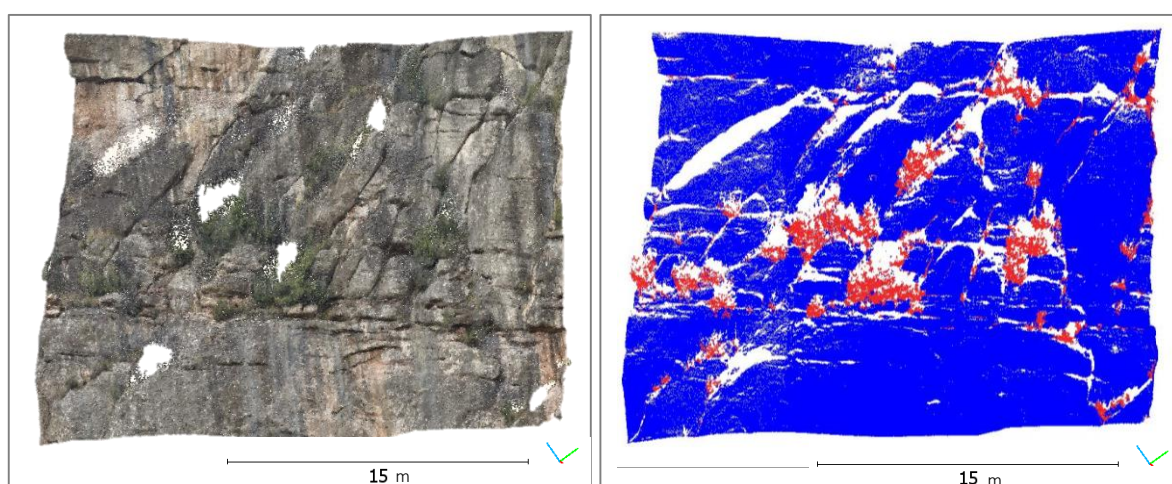


Figura II.5 - Comparació entre un model fotogràfic i la seva correspondència en el núvol de punts binaris. En vermell els punts corresponents a la vegetació i en blau els punts corresponents a la paret.

Un cop s’ha aplicat l’algoritme sobre els núvols de punts del Juliol i del Desembre 2015 s’han eliminat els punts que corresponen a la vegetació. (Taula II.3)

Taula II.3 - Relació dels punts rocosos i de vegetació després d'aplicar l'algoritme CANUPO als núvols de punts

	<i>Punts Totals</i>	<i>Punts Rocosos</i>	<i>%</i>	<i>Punts de Vegetació</i>	<i>%</i>
<i>Juliol 2015</i>	9.119.881	6.668.644	73.12	2.451.237	26.87
<i>Desembre 2015</i>	9.411.878	6.783.918	72.07	2.627.960	27.92

2.5. Comparació del núvol de punts

La comparació entre núvol de punts (Juliol vs Desembre) s’ha realitzat amb l’algoritme M3C2 que permet obtenir una comparació entre dos núvols de punts més acurada que els mètodes utilitzats

en treballs anteriors com Blanch (2015). Aquest algoritme de càlcul es troba integrat amb el programari lliure CloudCompare V2.

D'aquesta metodologia que està àmpliament explicada per Lague, et al. (2013) es destaca que a diferència d'una comparació estàndard entre núvol de punts que s'efectua punt a punt l'algoritme M3C2 fa una cerca més harmonitzada i dona com a resultat el valor mig de la distància dels punts que es troben en un determinat cilindre.

Aquest algoritme genera els següents passos:

- Cerca dels punts veïns al punt que es vol avaluar. (Quants més punts veïns s'introdueixen més es difuminen les irregularitats locals). (Figura II.7 - a)
- Generació del pla mig que inclou tots els punts veïns trobats i càlcul del vector normal del pla. (Figura II.7 - a)
- Generació del cilindre amb origen al punt que es vol avaluar i direcció del vector normal identificat anteriorment. (Figura II.7 - b)
- Càlcul de la distància mitja entre els punts dels dos núvols que queden inscrits a l'interior del cilindre. (Figura II.7 - b).

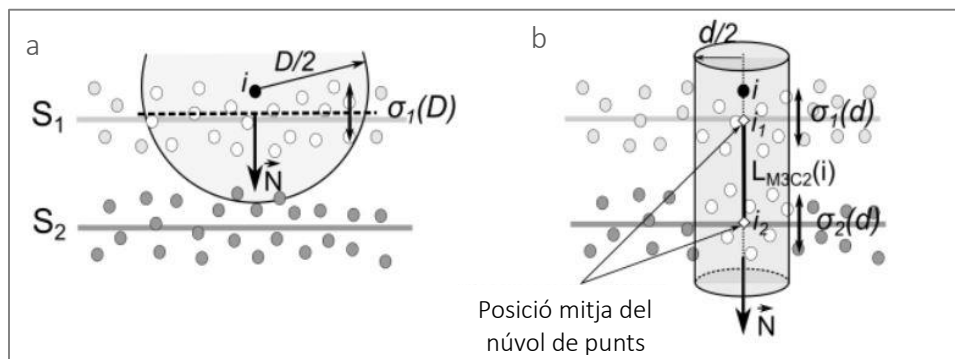


Figura II.7. a) Cerca de punts veïns i generació del pla mig i la seva component normal N_i . b) Construcció del cilindre i càlcul de la distància mitja dels punts inscrits. Modificat de Brodu & Lague (2011)

Aquest mètode permet reduir els errors relacionats amb la rugositat, minimitza les distàncies trobades i defineix millor els despreniments. Aquest fet és així perquè a diferència d'altres mètodes que donen la distància al punt més proper (amb indiferència de si són els punts homòlegs entre els dos núvols de punts) aquest mètode dona la distància mitja entre els punts que estan dins d'un cilindre el qual es genera a partir de la direcció del pla on es troba el punt concret que s'avalua amb indiferència de si són els punts més pròxims o no.

En aquest punt, a partir de l'aplicació de l'algoritme de comparació es pot estimar una desviació estàndard associada a l'error instrumental i a l'error metodològic. Aquest valor s'ha avaluat en una zona que es considera sense deformació ni desprendiments formada per 13.458 punts que representen aproximadament 24 m² de paret. A partir de l'aplicació de l'algoritme M3C2 en aquesta zona s'ha obtingut una desviació estàndard de 0,76 centímetres obtenint l'histograma que s'observa en la Figura II.8

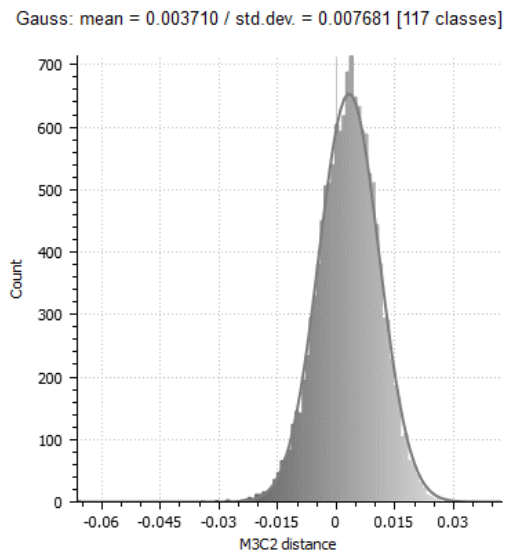


Figura II.8 - Histograma del resultat de la comparació entre les dos núvols de punts d'una zona que es considera sense moviment

2.6. Detecció dels desprendiments

Amb el resultat anterior s'obtenen les diferències que es produeixen entre dues captures consecutives realitzades a l'escarpament. Aquestes diferències s'interpreten com un desprendiment quan el valor de diferència ha resultat negatiu. Cal remarcar que la comparació d'escanejos ens determina estrictament el guany o pèrdua de material entre dos escanejos. Donades les característiques de la paret i després de les observacions realitzades al camp en aquest treball s'interpreten totes les pèrdues de material com a desprendiments.

Les dades obtingudes de la comparació s'han filtrat eliminant els punts on la diferència no superés el llindar de 1,5 centímetres. Aquest valor correspon a dos cops la desviació estàndard obtinguda (error instrumental i metodològic) en l'histograma de la zona estable. D'aquesta manera es treballa amb un interval de confiança del 95% que ens permet gairebé assegurar que tots els punts que s'estan filtrant corresponen a superfícies que no han patit cap moviment.

Per obtenir el conjunt de punts que representen un desprendiment (un clúster) s'ha emprat la metodologia descrita per Tonini i Abellan (2014) que es basa en realitzar:

- a) un filtratge de soroll aplicant l'algoritme de búsqueda de clusters DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) (Ester, et al., 1996) amb l'objectiu d'eliminar tots els punts que no es consideren desprendiments.
- b) un filtratge manual on s'han eliminat aquelles agrupacions de punts que malgrat haver superat el procés de filtrat de l'apartat (a) no són desprendiments, típicament errors de vora associats a les fractures subverticals que es produeixen en els escanejos LiDAR

- c) assignació i identificació de cadascún dels despreniments a partir de l'aplicació, novament, de l'algoritme DBSCAN.

El DBSCAN és un algoritme que a partir dels paràmetres d'entrada a) Mínim número de punts veïns per a formar un clúster (*MinPts*) i b) Distància màxima on buscar els punts veïns (*Eps*) recorre tot el núvol de punts cercant en cada punt si existeixen un mínim número de punts veïns (paràmetre a) que estiguin dins de la distància de cerca (paràmetre b). En cas afirmatiu, el resultat és un clúster conformat per tots els punts que compleixen (a) i (b) (Figura II.9). En la realització d'aquest estudi s'ha pres com a número mínim de punts per formar un clúster 10 i distància màxima de cerca 10 centímetres. S'han seleccionat aquests paràmetres perquè s'han considerat suficientment amplis com per incloure els punts que conformen els despreniments degut a la densitat de punts dels núvols originals.

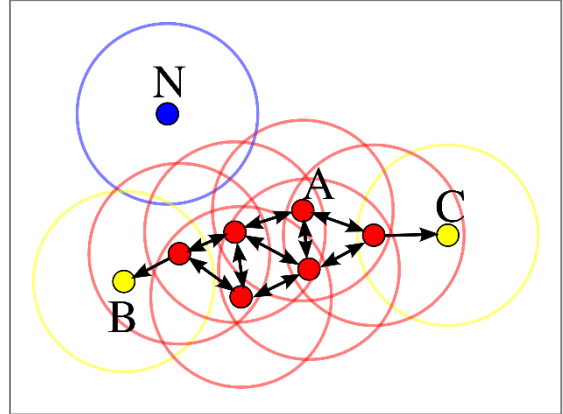


Figura II.9 – Representació de l'algoritme DBSCAN. En vermell i groc els punts que compleixen la condició de *MinPts* = 3 i *Eps* = radi de les circumferències. En blau, el punt que queda exclòs del clúster. Font: Wikipedia - <https://es.wikipedia.org/wiki/DBSCAN>

Després d'aplicar aquest procés a la comparació entre escanejos, el resultat que s'ha obtingut és el número total de despreniments que s'han produït al llarg del temps d'observació de l'escarpament.

2.7. Càlcul dels volums

El volum dels despreniments detectats mitjançant el procediment anterior es calcula a partir de la triangulació de tots els punts que conformen el despreniment. D'aquesta manera s'ha calculat el volum de tots els prismes triangulars que es poden formar a partir de tots els punts que conformen el clúster detectat.

El procediment de càlcul s'ha realitzat desenvolupant els següents passos amb el programari MATLAB (MathWorks):

- es realitza una triangulació de tots els punts que representen el despreniment;
- es calcula l'àrea de cadascun dels triangles que s'ha generat. Com que la triangulació dels punts dona com a resultat una superfície (2D) és necessari multiplicar per una alçada per tal d'obtenir els prismes triangulars i per tant el seu volum;

- c) es multiplica l'àrea obtinguda en l'apartat (b) per el màxim valor de diferència dels tres punts triangulats;
- d) es sumen tots els volums obtinguts i s'obté el volum total del despreniment.

A l'hora de multiplicar un triangle per obtenir el prisma triangular (punt C) s'ha optat per la diferència màxima dels tres punts perquè es considera que, malgrat poder donar en alguns casos volums majors als reals, els resultats s'ajusten millor als volums reals. Aquesta consideració també parteix de la preferència per sobrevalorar els volums calculats amb el benentès que totes les mesures que es poden prendre a partir d'aquests càlculs sempre quedaran dimensionades per la banda de la seguretat.

3. ANÀLISI ESTRUCTURAL DE L'ESCARPAMENT

La metodologia que s'ha emprat per a realitzar l'anàlisi estructural de l'escarpament és la que es pot veure resumida en la Figura II.10 i que s'explica en els propers apartats. Aquesta flux de treball es basa en una modificació de la metodologia desenvolupada per García-Selles que s'ha emprat amb èxit en Santana, et al. (2012).



Figura II.10 - Flux de treball realitzat per obtenir les orientacions dels plans a partir de dades LiDAR

3.1. Adquisició de dades

Per a realitzar l'anàlisi estructural de l'escarpament estudiat s'han fet servir tres tipologies de dades. Escaners LiDAR, fotografies digitals i dades obtingudes al camp amb brúixola, cadascuna d'aquestes dades s'ajusta a les següents necessitats.

Dades LiDAR

Les dades LiDAR que s'han fet servir per a aquest apartat corresponen a les dades obtingudes en la captura del Desembre 2015. Els procediments que s'han aplicat a aquest núvol de punts són els mateixos que s'han comentat en l'apartat de la detecció dels desprendiments. S'ha fet servir el núvol de punts georeferenciat i amb el filtre de vegetació aplicat.

Fotografies

Les dades fotogràfiques que s'han fet servir per a aquest treball han estat realitzades en les diverses visites a la zona d'estudi. S'han realitzat amb una càmera fotogràfica Nikon D7200 que té un sensor de dimensions 23,5 mm x 15,6 mm i registra la informació en 24,2 megapixels. El cos s'ha acompanyat d'una òptica fixa de 35 mm de distància focal (52,5 mm corresponent a una càmera de format complet) amb obertura màxima de diafragma de 1,8. Per als casos on degut a la proximitat de l'escarpament es requeria una distància focal inferior s'ha fet servir una òptica zoom amb una distància focal mínima de 18 mm i màxima de 105 mm que té una obertura màxima de diafragma de 3,5.

Les fotografies s'han capturat en format RAW i en format JPEG sense compressió. Per a realitzar el model, s'han fet servir directament els formats JPEG per evitar el procés de revelat digital. Les captures s'han realitzat fixant l'obertura del diafragma al valor on menys aberracions cromàtiques i menys distorsions es generen. Per l'objectiu fixe de 35 mm s'han realitzat amb una obertura f3.5 i per l'objectiu zoom 18-105 mm f5.6.

En total s'han realitzat 202 captures des de 12 posicions diferents per a poder obtenir informació de tot l'escarpament des de diferents angles per minimitzar les zones d'ombra. Les fotografies s'han realitzat intentant garantir una superposició entre imatges de com a mínim el 50% i mantenint en tot moment la perpendicularitat amb l'escarpament tal i com es mostra en la següent Figura II.11 per realitzar correctament l'alineació.

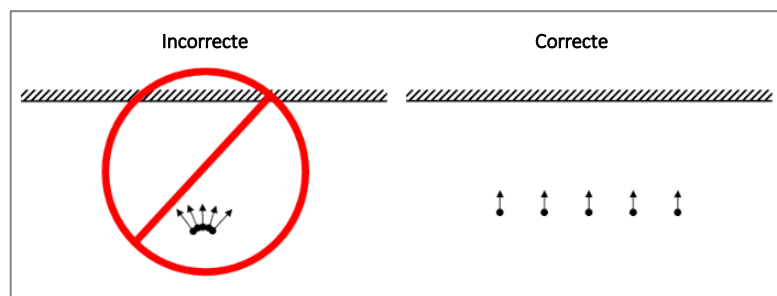


Figura II.11 - Distribució de les captures per mantenir la perpendicularitat amb l'escarpament. Si només es mou l'angle de captura i no la posició de la càmera no es poden aplicar les equacions fotogramètriques. Modificat de Agisoft Photoscan (2013)

Dades de camp

Les dades de camp s'han obtingut en les diverses visites que s'han realitzat a la zona d'estudi. Es poden dividir en, mesura de plans (s'han realitzat dues sortides amb aquesta finalitat) i amb la realització d'un *scanline* amb l'equip de tutors i tècnics de la Universitat de Barcelona. Aquestes mesures s'han realitzat amb l'objectiu de conèixer l'aflorament, obtenir més informació i poder

corroborar els resultats que s’han obtingut amb els procediments realitzats a partir de les dades LiDAR.

Degut a la impossibilitat per accedir a la paret que forma l’escarpament objecte d’aquest estudi les dades s’han mesurat en afloraments propers més accessibles que presentaven una mateixa naturalesa estructural. D’aquesta manera s’han mesurat 62 plans i s’ha realitzat un *scanline* de 32 metres (Figura II.12).

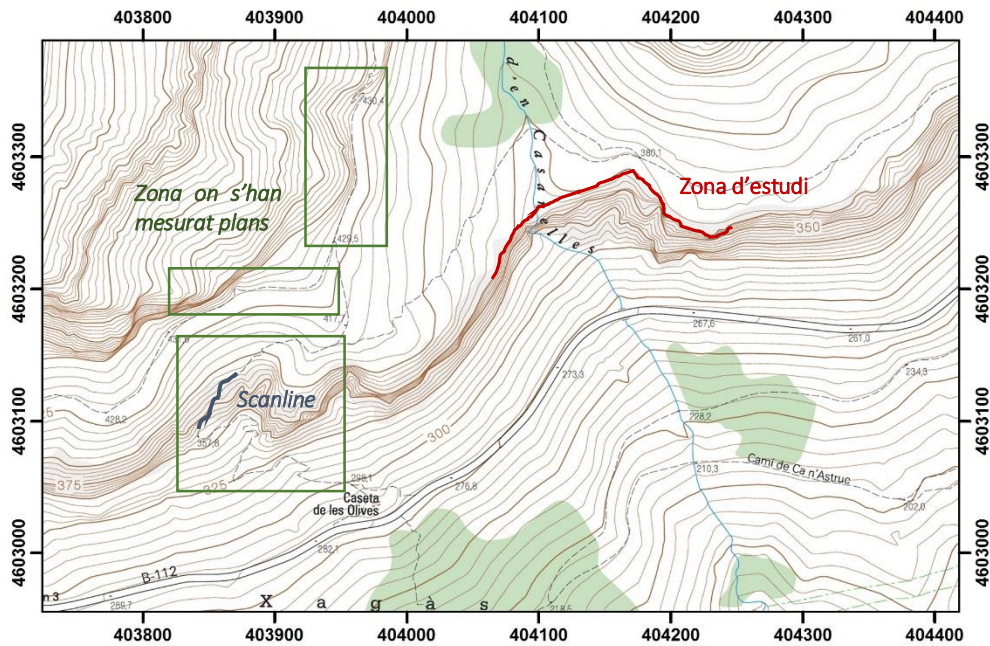


Figura II.12 - Mapa de situació de les mesures realitzades al camp.

3.2. Regressió Planar

La necessitat d’obtenir resultats absoluts (orientacions i cabussaments dels plans) obliga a fer servir les dades georeferenciades de manera absoluta, per aquest motiu, per a poder aplicar la metodologia s’ha de realitzar primerament una alineació respecte les diferents captures i una posterior georeferenciació a partir de les dades del LiDAR aeri del ICGC com s’ha explicat anteriorment en l’apartat de la detecció dels desprendiments.

Amb les dades correctament alineades i georeferenciades s’ha procedit a calcular la regressió planar. Aquest procediment s’ha realitzat amb el programari SEFL (*Surface Extraction From LiDAR*) (García-Sellés, et al., 2011).

La regressió planar consisteix en assimilar un conjunt de punts a un pla generat que els contingui. Per a realitzar aquest procediment cal indicar un radi de cerca on s’aplicarà un anàlisi de moment d’inèrcia que obtindrà com a resultat una matriu amb els vectors que uneixen cada punt veí respecte

el centre de masses de tots els punts inscrits dins del radi establert. D'aquesta manera es poden trobar els valors propis (VAPS) i els vectors propis (VEPS) de la matriu.

El valor propi VAP1 i el vector propi VEP1 corresponen a la orientació on hi ha la màxima densitat de vectors, per contra, el VAP3 i el VEP3 corresponen a l'orientació amb la mínima densitat de vectors i el màxim moment d'inèrcia. Sent el pol del pla que millor s'ajusta.

El procés genera paràmetres que permeten validar la qualitat de l'ajust realitzat. Aquests valors corresponen a la coplanarietat (M) i a la col·linealitat (K). La coplanarietat, s'extreu a partir de la relació $M = \ln\left(\frac{VAP1}{VAP3}\right)$ i ens indica el grau d'ajustament a un pla idealitzat. Per altra banda la

col·linealitat s'extreu a partir de la relació $k = \frac{\ln\frac{VAP1}{VAP2}}{\ln\frac{VAP2}{VAP3}}$ i ens indica la fiabilitat de les orientacions obtingudes (García-Sellés, et al., 2011).

Un cop s'ha obtingut el fitxer amb la regressió planar i els valors de col·linealitat i coplanarietat s'ha procedit a filtrar el núvol de punts. Amb aquest filtre s'eliminen els punts que tenen un pitjor ajust o que tenen els valors d'orientació menys fiables. Per a aquest treball s'ha decidit filtrar pels valors que s'observen a la Taula II.4 eliminant els punts de la Figura II.13.

Taula II.4 – Valors utilitats de col·linealitat i coplanarietat

Atribut	Valors eliminats
Col·linealitat (K)	>2,68
Coplanarietat (M)	<0,25

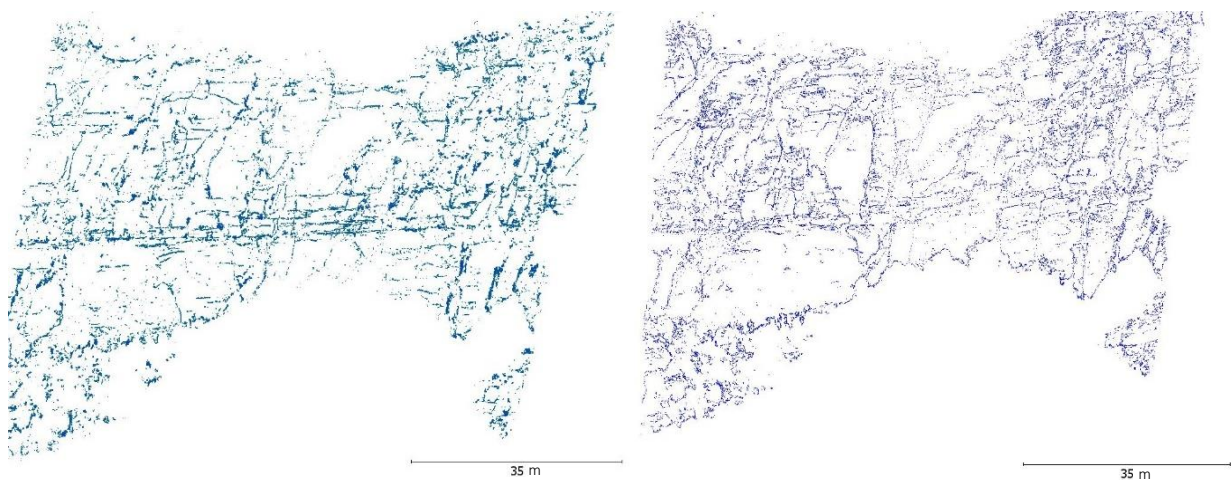


Figura II.13 - Punts eliminats. a) Pel filtratge de la col·linearitat. b) Pel filtratge de la coplanarietat

3.3. Identificació de Famílies

Un cop s'ha realitzat el filtratge pels paràmetres de col·linealitat i coplanarietat s'ha procedit a triar dues zones d'estudi per a realitzar la identificació de famílies. La selecció de les zones d'estudi s'ha realitzat tenint en compte les zones on hi hagués més densitat de dades LiDAR, on aquestes haguessin estat capturades amb la màxima precisió (zones el més perpendiculars possibles a la visual del LiDAR) i on es pogués trobar identificades totes les famílies de l'aflorament, és a dir, que les orientacions de les respectives parets fossin diferents de tal manera que en superfície es pogués trobar les expressions de totes les famílies que afecten el massís.

Amb les dues zones d'estudi seleccionades, Zona A i Zona B (Figura II.14), s'ha procedit a fer la detecció de les superfícies. Per a realitzar la discretització de les superfícies s'ha buscat un sector de la zona d'estudi que estigui ben representada i que presenti superfícies clarament visibles i definides. En aquestes zones, de manera visual mitjançant el programari CloudCompare V2, s'han anat filtrant valors d'orientació i cabussament fins a obtenir els rangs que conformen una mateixa superfície. En tots els casos s'ha decidit comprovar si l'agrupació de punts que conformen un pla conjugat ($\pm 180^\circ$) formaven part de la mateixa possible família.

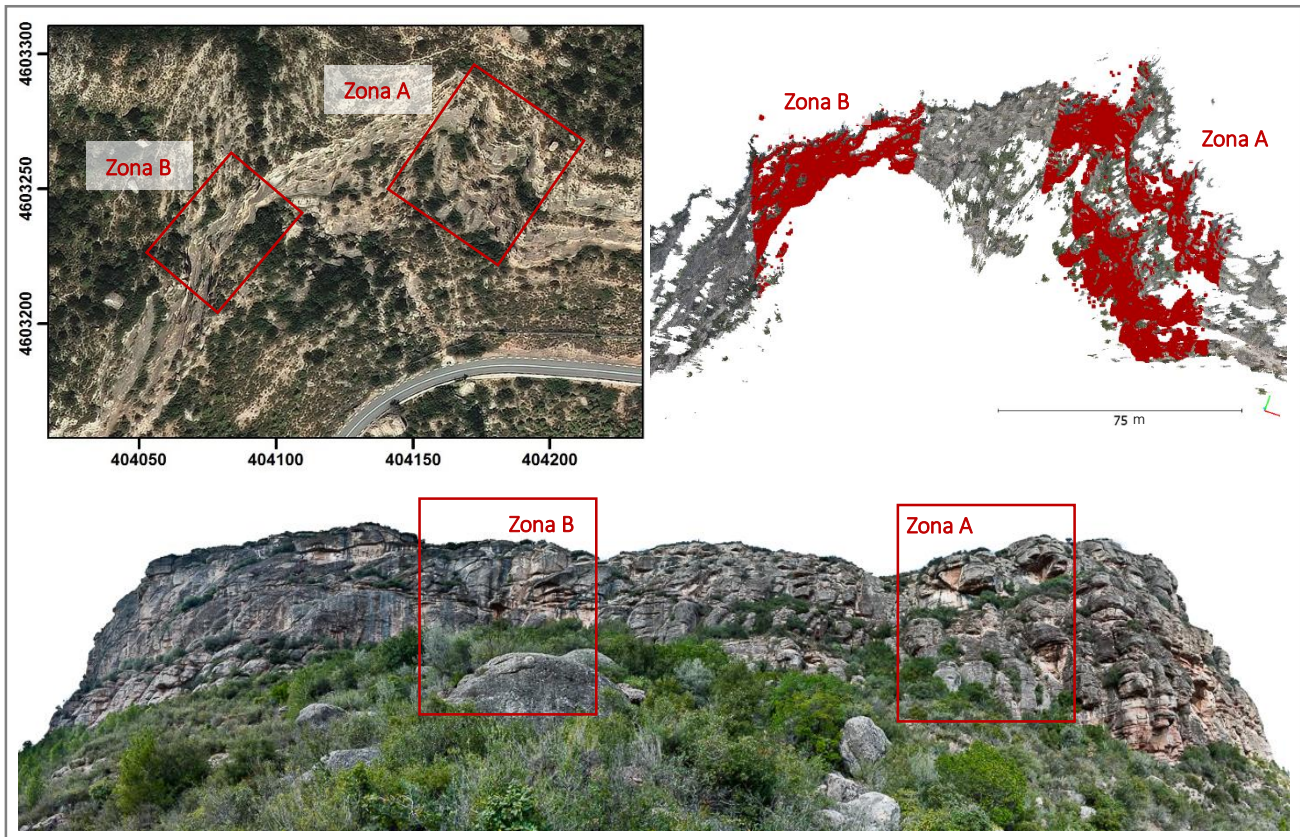


Figura II.14 - Detall de les zones seleccionades per a realitzar la identificació de famílies.

D'aquesta manera, i ampliant el procés a diferents sectors de les diferents zones d'estudi i ajustant els rangs de manera iterativa, s'ha acabat determinant les agrupacions de superfícies que conformen les famílies detectades (Figura II.15).

Aquests rangs d'orientació i cabussament s'han exportat per a poder-los representar amb una projecció estereogràfica. Per a aquest cas s'ha fet servir el programari DIPS (*RockScience*) que ens ha permès representar el mapeig de densitat dels pols de cada família.

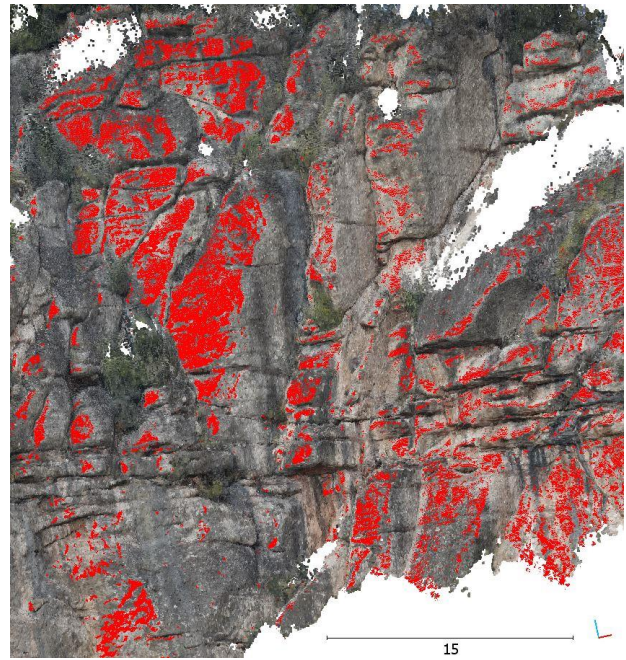


Figura II.15 - Identificació de les famílies segons els rangs d'orientació i cabussament seleccionats. En vermell una família seleccionada.

3.4. Model Fotogramètric

La realització del model fotogramètric amb el programari Agisoft PhotoScan es pot sintetitzar en els següents passos:

- a) Selecció d'imatges
- b) Màscara de treball
- c) Cerca de punts homòlegs i alineació
- d) Generació del núvol de punts.

La selecció de les imatges s'ha de realitzar, primerament, per introduir imatges que superin el llindar de qualitat de 0,5 que atorga el mateix programari i seguidament per a evitar introduir imatges redundants o que puguin augmentar l'error. Per aquest motiu imatges que han quedat borroses, massa fosques o que no formen part de tot un set de fotografies no s'han introduït al programari.

L'altre pas a realitzar en la selecció d'imatges és introduir quines imatges han estat preses des del mateix lloc, de tal manera que el programari pugui processar tot un lot d'imatges assumint que la càmera està estàtica.

La màscara de treball s'ha aplicat per a eliminar el cel i les zones de vegetació (Figura II.16). Aquest pas s'aplica per millorar la qualitat en l'alineació de les fotografies ja que quan més homogeni sigui el conjunt de píxels més dificultats hi ha per trobar punts homòlegs. D'aquesta manera eliminat

aquestes zones homogènies es millora l'alineació. A més a més, un altre motiu rellevant per eliminar el cel és que entre dues captures realitzades amb interval de temps significatiu els núvols es poden haver mogut forçant al programari a alinear els punts homòlegs detectats en els núvols introduint



Figura II.16 - Comparativa de la mateixa fotografia amb i sense màscara.

errors en l'alineació.

Amb totes les imatges seleccionades i correctament processades per eliminar la vegetació i el cel s'ha procedit a fer la cerca de punts homòlegs i la corresponent alineació. En aquest procés el programari fa una cerca de punts homòlegs que es troben a les diferents fotografies a partir dels quals estableix la posició de la càmera en el moment de fer les diferents fotografies. A partir d'aquest posicionament i de les relacions fotogramètriques entre els punts homòlegs s'obté un núvol de punts que conté la posició x,y,z de cada un juntament amb el codi de color RGB que li correspon.

Un cop s'obtenen les posicions de les càmeres i a partir de la informació RGB de les fotografies es genera el núvol de punts (Figura II.17), aquest permet ser treballat de la mateixa manera que el núvol de punts LiDAR obtingut aplicant-hi els processos de regressió planar explicats amb anterioritat.

Per a realitzar el model fotogramètric per aquest treball s'ha fet servir la màxima qualitat en tots els paràmetres fet que ha implicat temps de càlcul elevats.



Figura II.17 - Resultat obtingut a partir del model fotogramètric.

3.5. Càlcul i distribució d'espaiats

Per a realitzar el càlcul dels espaiats s'ha transformat el núvol de punts que conformen una família en un conjunt de plans. Aquest procediment s'ha realitzat mitjançant el mòdul qFACETS del programari CloudCompare realitzat per Thomas Dewez (BRGM). Aquest algoritme mitjançant una regressió planar converteix els punts de cada família en plans a partir de clústers que el programari identifica. Aquest mòdul permet introduir com a paràmetres la distància a la que ha de buscar els punts veïns per a conformar el pla, el número mínim de punts que ha de conformar un pla i l'extensió màxima que aquests poden tenir.

A partir d'aquests paràmetres el mòdul retorna el conjunt de plans que s'ajusten a la família que hem introduït.

Amb els resultats obtinguts s'ha cregut adient filtrar-los per a obtenir els plans més representatius de l'orientació de cada família. Per aquest motiu s'ha fet servir un filtre mitjançant una projecció estereogràfica a partir de la qual es selecciona la zona amb més densitat de pols. Aquest filtre permet separar els plans que són més paral·lels eliminant plans que tenen orientacions diferents els quals s'associen a soroll o errors a l'hora de fer el filtratge per famílies.

A partir d'aquest filtrat, s'ha exportat la informació obtenint un fitxer amb els vectors normals de cada pla i les coordenades del centre de masses del pla. A partir d'aquest punt i amb els paràmetres obtinguts s'utilitzen les dades per treballar de manera geomètrica amb qualsevol programari de càlcul.

Abans de calcular la distància entre els diferents plans s'ha procedit a realitzar una idealització de les superfícies, convertint-les en paral·leles. Aquesta paral·lelització s'ha realitzat perquè si no es respectés aquesta condició entre dos plans hi haurien infinites distàncies. La manera de convertir tots els plans en plans paral·lels ha consistit en trobar un vector normal mitjà a tots els plans i convertir-lo en el vector normal que regeix en tots els plans representats. Aquesta hipòtesi idealitza els plans considerant-los infinits en l'espai.

Un cop realitzat aquest procés s'ha procedit a calcular l'equació paramètrica (1) de cada pla a partir del vector director (A,B,C) i del punt de les coordenades del centre de masses del pla (x,y,z)

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

Amb l'equació paramètrica de cada pla s'ha procedit a calcular la distància entre tots els punts de tots els centres de massa (x,y,z) i el pla en qüestió (A,B,C,D) fent servir l'equació (2)

$$Dist = \frac{|Ax + By + Cz + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

El resultat obtingut és un vector amb totes les distàncies que hi ha des d'un pla fins a tots els altres plans que conformen la família. Al fer aquest procés iteratiu en tots els plans s'acaba obtenint una matriu triangular on la diagonal és la distància entre un pla i ell mateix, és a dir, 0.

Eliminant la diagonal de la matriu i quedant-nos el valor més petit de cada columna o fila (és una matriu triangular) s'obté el vector que té les distàncies mínimes des de cada pla.

Per tal d'obtenir una representació d'aquests resultats es genera l'histograma corresponent a cada família i s'ajusta una corba exponencial negativa que serà el resultat final de tot el procés.

D'aquesta manera els processos realitzats amb el programari Matlab es poden resumir en:

- a) Càlcul del vector normal mitjà
- b) Paral·lelització dels plans
- c) Càlcul de l'equació paramètrica dels plans
- d) Càlcul de la distància punt – pla
- e) Filtrat distàncies mínimes
- f) Histograma i corba d'ajust.

PART III. RESULTATS, DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

4. RESULTATS DETECCIÓ DE DESPRENIMENTS

4.1. Detecció de desprendiments

Els desprendiments detectats emprant la metodologia que s'exposa en aquest treball es poden veure resumits en la Taula III.1. En total s'han detectat 30 desprendiments en la zona d'estudi. Aquests desprendiments tenen unes magnituds compreses des de 0,0039 dm³ (que equival a un cub de 3,5 cm de costat) fins a 14,0 dm³ (que equival a un cub de 24 cm de costat). La suma dels volums de tots els desprendiments detectats correspon a 0,042 m³.

L'activitat que s'ha detectat a l'escarpament no és homogènia pel que fa a la magnitud dels desprendiments com s'observa en l'histograma de la Figura III.1 tot i així a excepció del desprendiment més gran (14,0 dm³) tots els desprendiments són inferiors al 0,01 m³ i un 83% dels desprendiments són inferiors a 0,001 m³. Per aquest motiu, i a falta d'haver detectat un desprendiment més rellevant, observem que la majoria de desprendiments que es produeixen a l'escarpament són de baixa magnitud.

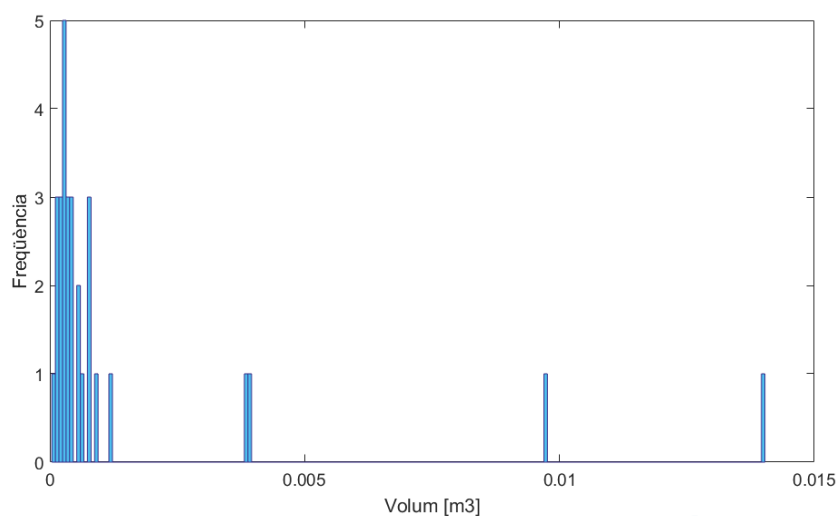


Figura III.1 - Histograma que relaciona els desprendiments amb la seva freqüència.

Taula III.1 - Desprendiments detectats i el seu volum

Desprendiment	Volum [dm ³]
1	14
2	3,9
3	1,2
4	0,39
5	0,8
6	3,8
7	0,34
8	9,7
9	0,19
10	0,91
11	0,18
12	0,35
13	0,77
14	0,25
15	0,27
16	0,28
17	0,42
18	0,74
19	0,57
20	0,19
21	0,29
22	0,42
23	0,13
24	0,0039
25	0,61
26	0,29
27	0,59
28	0,14
29	0,17
30	0,37

D'aquesta manera s'observa que la magnitud de l'activitat que es desencadena a la zona d'estudi és inversament proporcional al número de desprendiments que es detecten.

La localització dels desprendiments detectats es reparteix de manera aleatòria per tota la zona d'estudi sense detectar-se cap zona on hi hagi més concentració de desprendiments. En la Figura III.2 es representen els desprendiments pel seu centroide amb una grandària fixa (no equival al volum de cada desprendiment).

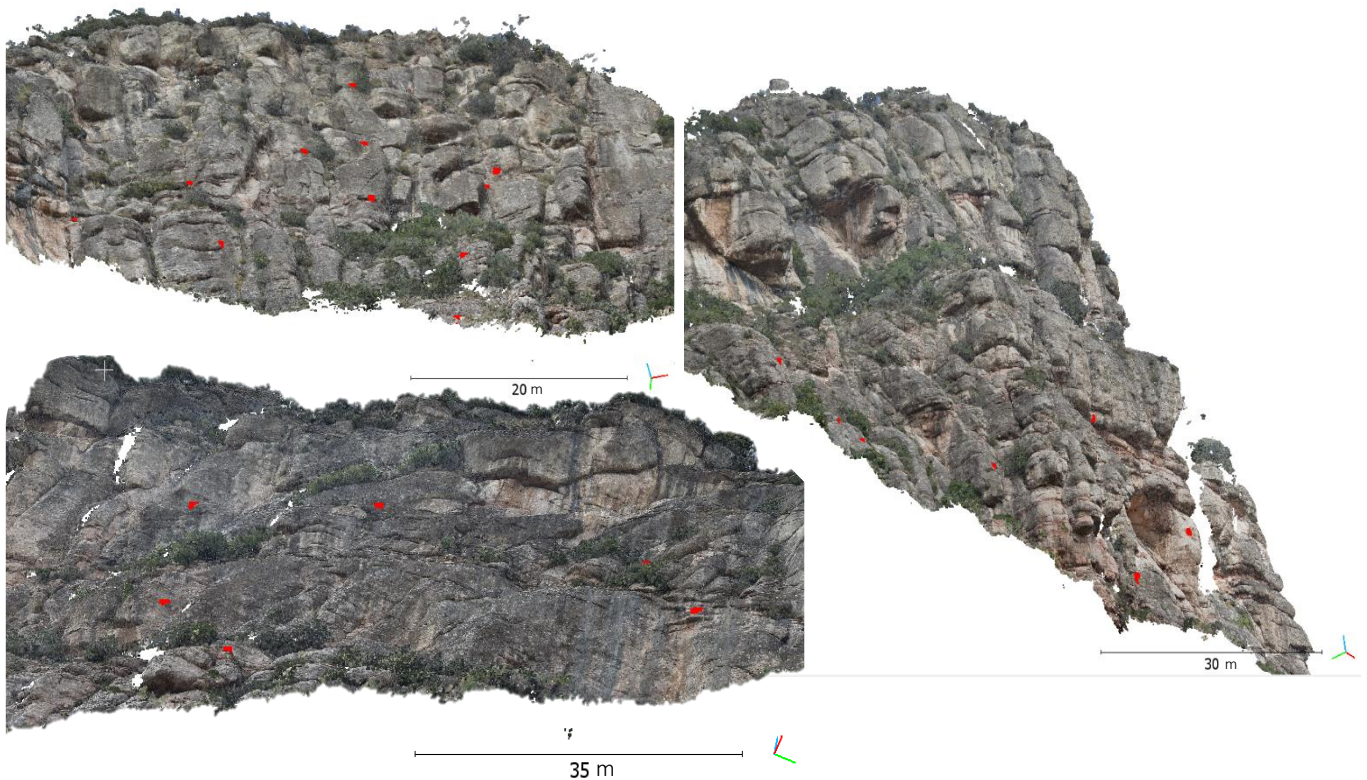


Figura III.2 - Representació espacial dels desprendiments detectats. De la fila superior a la inferior, part central de l'aflorament, part dreta de l'aflorament i part esquerra de l'aflorament. La dimensió dels desprendiments no té relació

Relació Magnitud-Freqüència

La relació magnitud-freqüència acumulada que s'ha trobat després d'analitzar els resultats es pot observar en la Figura III.3. En aquesta relació es defineix la magnitud com el volum en m^3 dels desprendiments detectats mentre que la freqüència correspon al nombre acumulat de vegades que s'ha produït un esdeveniment.

Aquest tipus de relació ens permet obtenir una equació potencial d'ajust que ens permet caracteritzar la zona d'estudi i comparar-la amb altres zones estudiades i inventariades.

L'equació potencial que millor ajusta a les dades que s'han obtingut és la que correspon a la següent expressió:

$$F = 0.0516 \cdot v^{-0.708}$$

En aquesta mateixa relació (Figura III.3) s'observa com els valors a mesura que la magnitud disminueix i la freqüència augmenta es desvien de l'equació potencial d'ajust definida. Aquest fet discutit en la bibliografia i conegut com a *rollover* (Van Den Eeckhaout, et al. 2007 i Malamud, et al. 2004) ens pot estar indicant que la metodologia emprada no és capaç de detectar tots els desprendiments de magnitud molt petita que s'han produït. Aquest fet pot ser degut a que s'està treballant molt al límit de l'error instrumental de la metodologia o bé perquè els desprendiments més petits que també es produeixen no es poden detectar per produir-se en situacions que dificulten la detecció (per exemple en zones on hi ha cobertura vegetal)

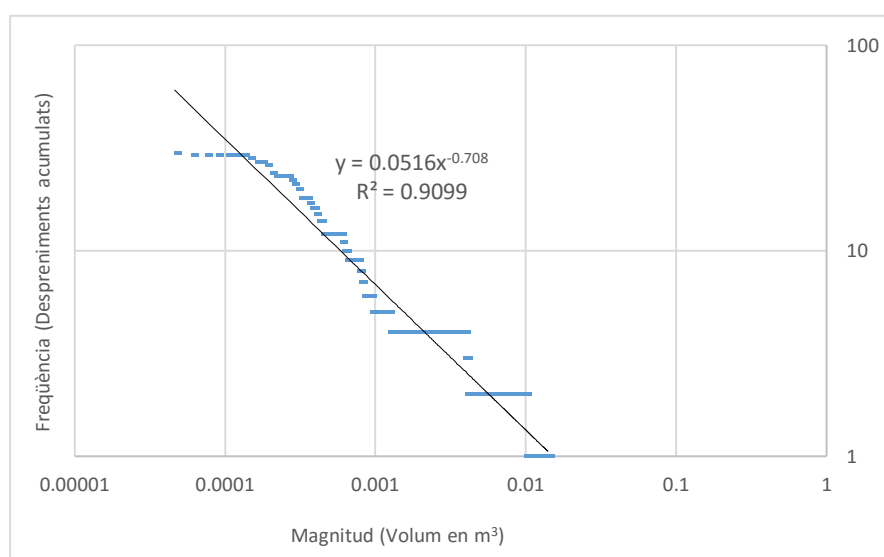


Figura III.3 - Relació Magnitud - Freqüència

5. RESULTATS ANÀLISI ESTRUCTURAL

5.1. Detecció famílies (LiDAR)

Les agrupacions en orientacions i cabussament similars de les diferent superfícies detectades segons la metodologia exposada ens ha permès determinar un conjunt de famílies que defineixen estructuralment les parts del massís estudiades.

Les orientacions que s'exposen en aquest treball es refereixen sempre a la direcció del cabussament.

A continuació es presenten les diferents agrupacions de superfícies que s'han fet servir per definir famílies. Cada agrupació correspon al conjunt de punts detectats dins d'un rang d'orientacions i cabussaments que formen una superfície. D'aquesta manera, les famílies detectades estan conformades per una o més agrupacions. La informació està dividida segons la zona d'estudi (A o B) i es presenten els corresponents histogrames amb la distribució segons la direcció del pla de cabussament dels punts seleccionats.

Per facilitar la visualització de les superfícies detectades s'adjunten també en les mateixes fitxes les projeccions estereogràfiques per a cadascuna de les famílies. Per fer les projeccions s'han tingut en compte els punts que representen cada família tan a la Zona A com a la Zona B.

Finalment, per detectar millor les diferents famílies i observar com aquestes queden ben determinades en l'espai, s'acompanya la informació amb una representació d'una secció de la Zona A on queden representades totes les famílies. La secció és la que s'observa en la Figura III.4 i per a cada família correspon un color determinat:

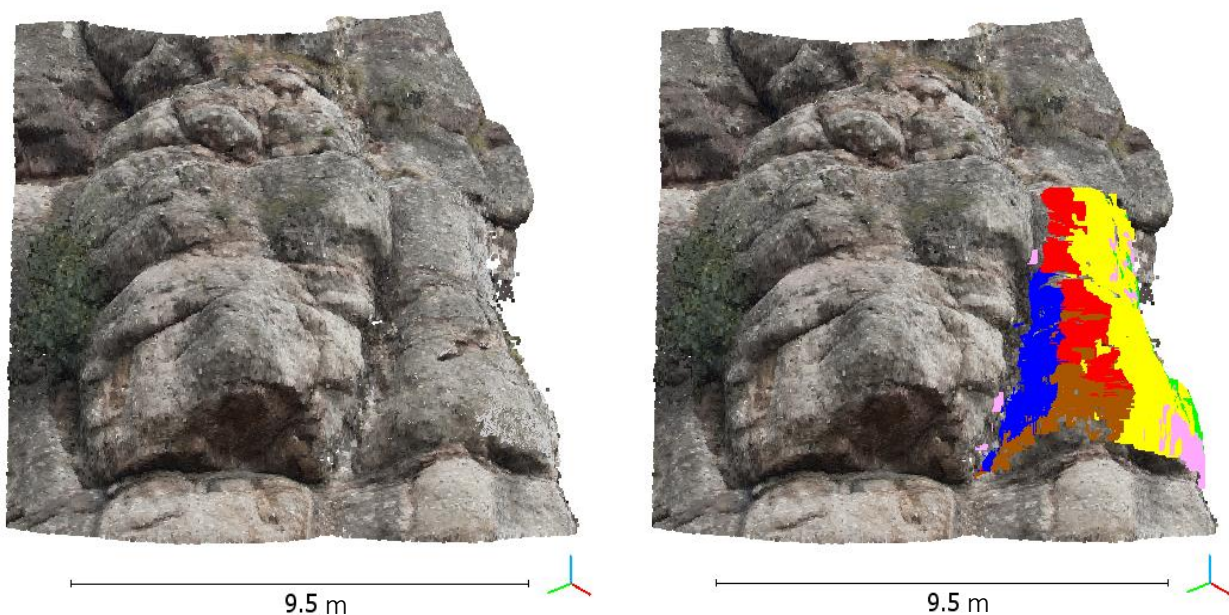
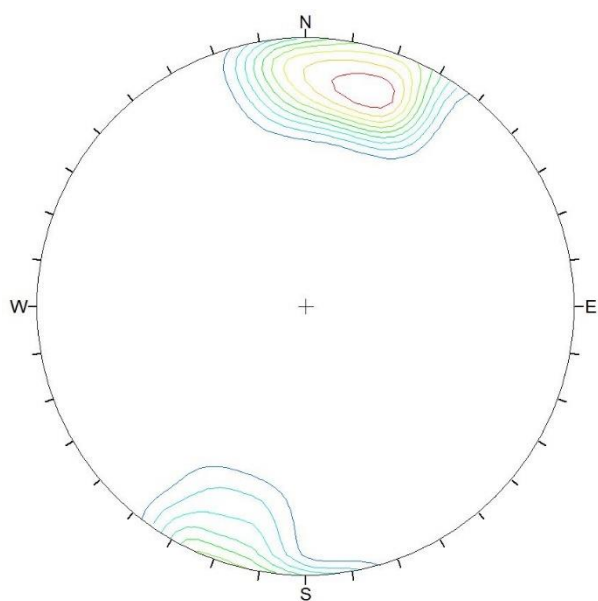
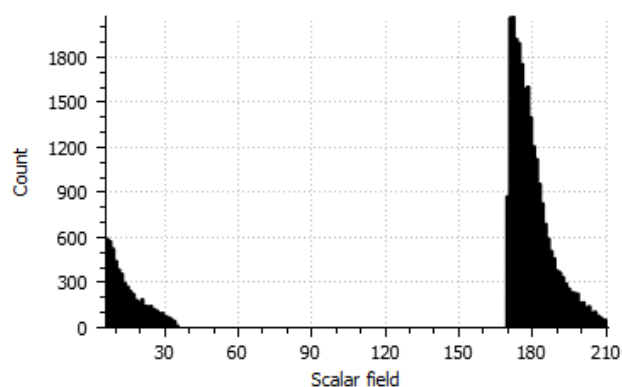
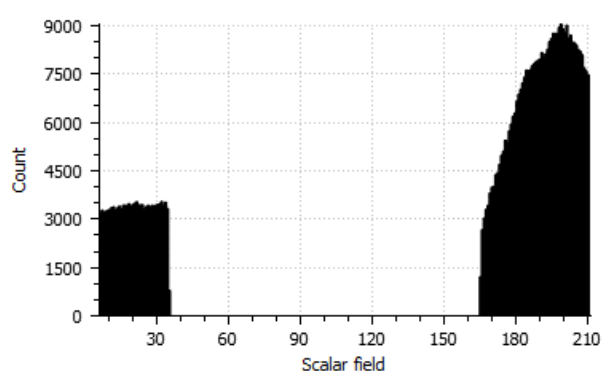


Figura III.4 - Representació sobre el model fotogramètric de les zona d'exemple per representar les famílies detectades

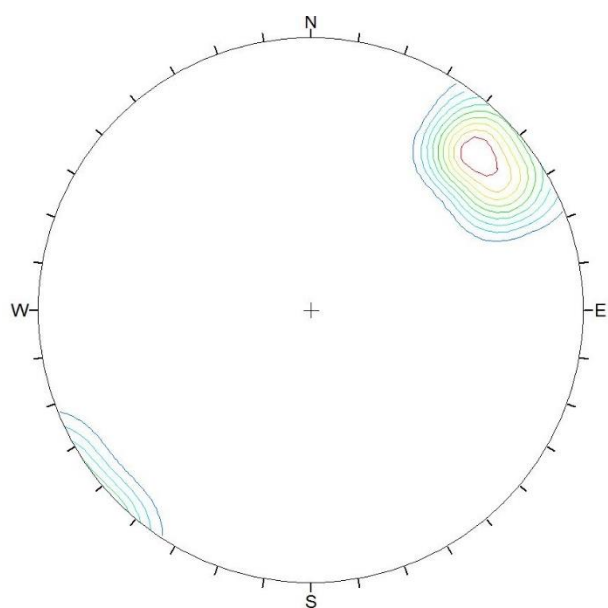
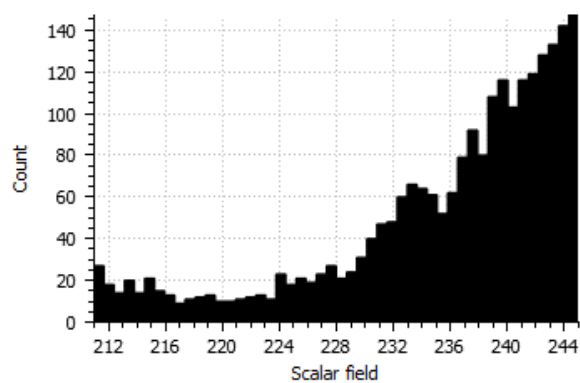
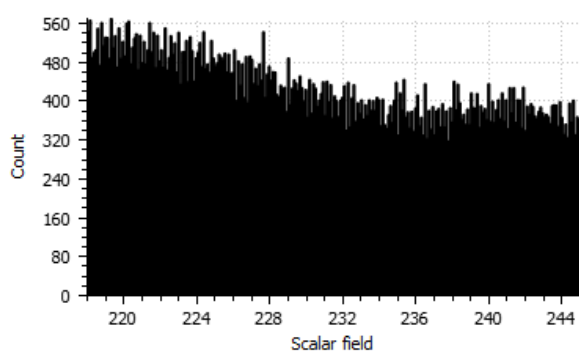
Superfícies	Orientacions	Cabussaments	Superfícies	Orientacions	Cabussaments
Agrupació 1a	006º a 035º	55º a 90º	Agrupació 1b	170º a 211º	55º a 90º

Família	Orientació més freqüent	Cabussament mitjà	Número de punts
Família 1 (Zona A)	198º	75º	522.121
Família 1 (Zona B)	172º	76º	30.664



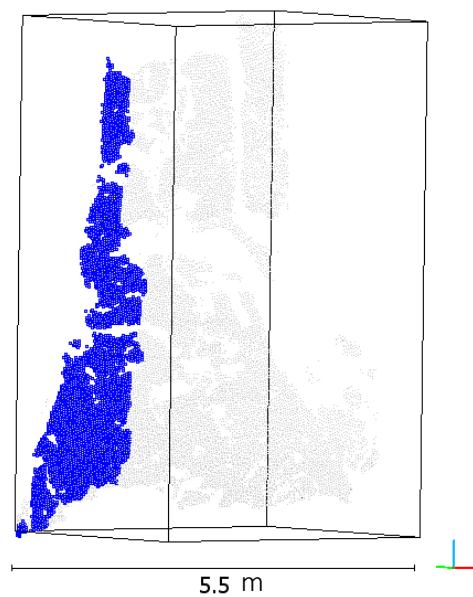
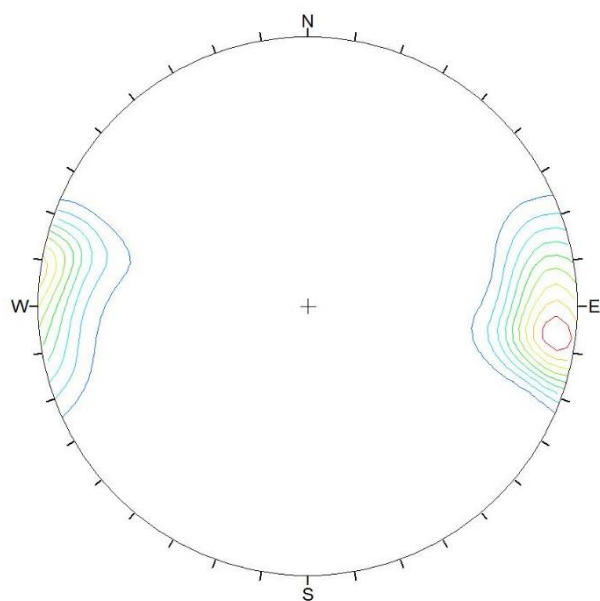
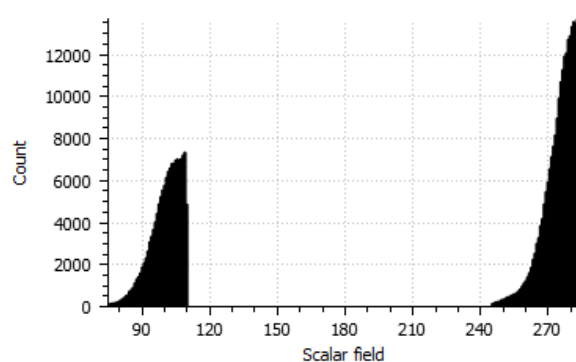
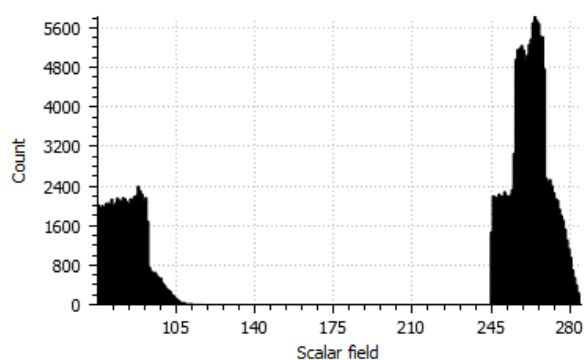
Superfícies	Orientacions	Cabussaments	
Agrupació 2a	218º a 245º	70º a 90º	

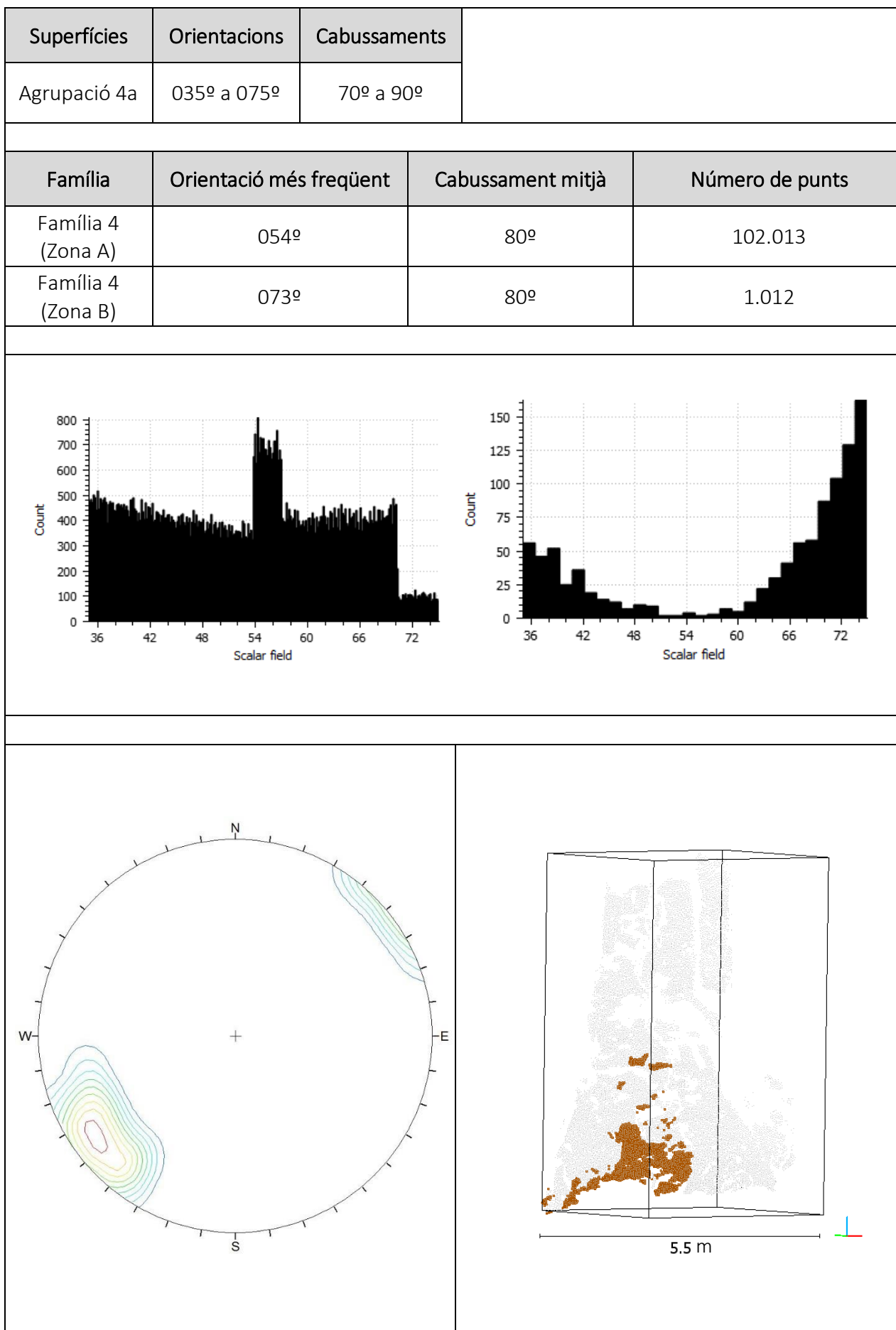
Família	Orientació mitjana	Cabussament mitjà	Número de punts
Família 2 (Zona A)	230º	79º	109.538
Família 2 (Zona B)	244º	71º	2.324

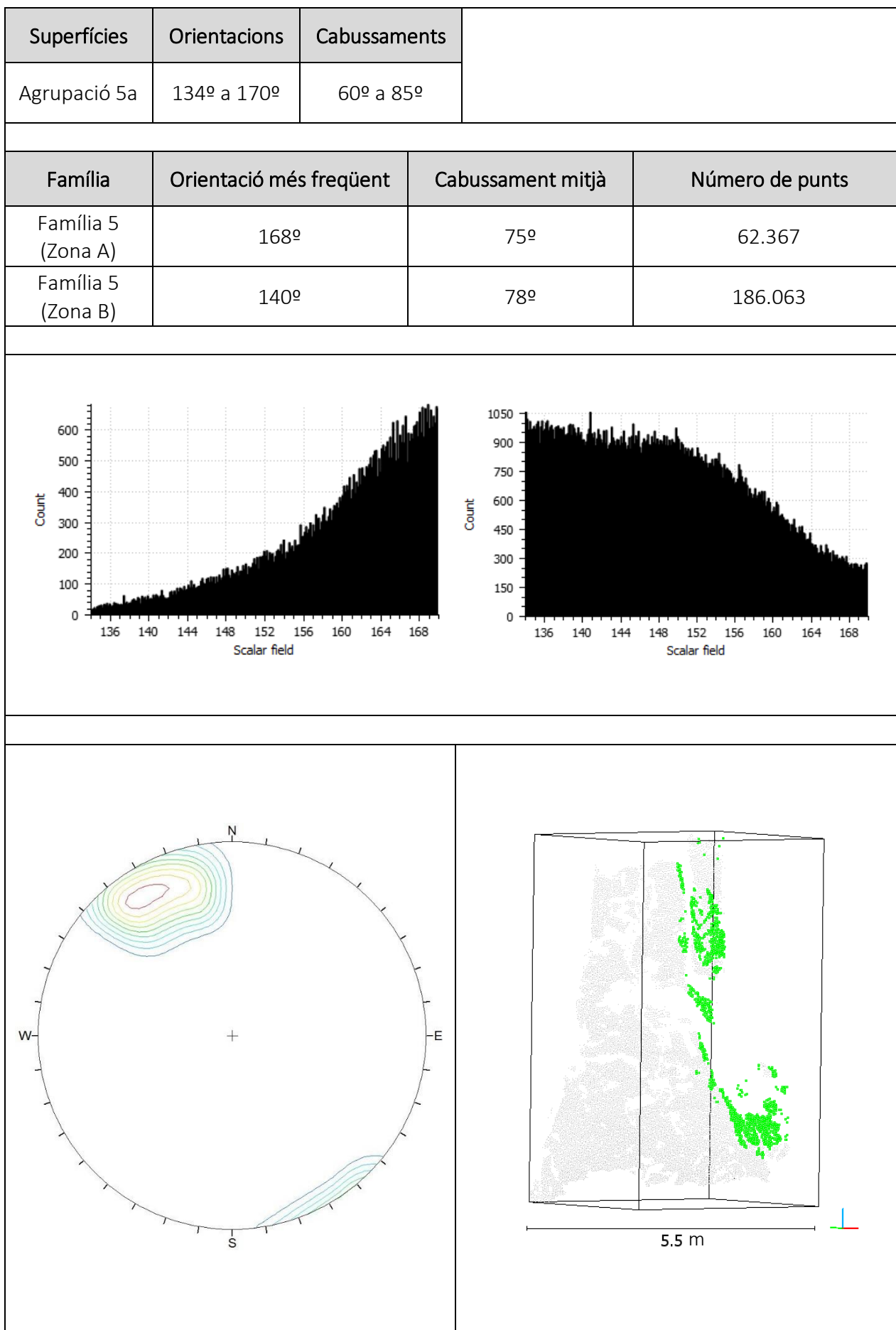


Superfícies	Orientacions	Cabussaments	Superfícies	Orientacions	Cabussaments
Agrupació 3a	075º a 110º	75º a 90º	Agrupació 3b	245º a 285º	75º a 90º

Família	Orientació més freqüent	Cabussament mitjà	Número de punts
Família 3 (Zona A)	264º	83º	206.028
Família 3 (Zona B)	280º	81º	391.727

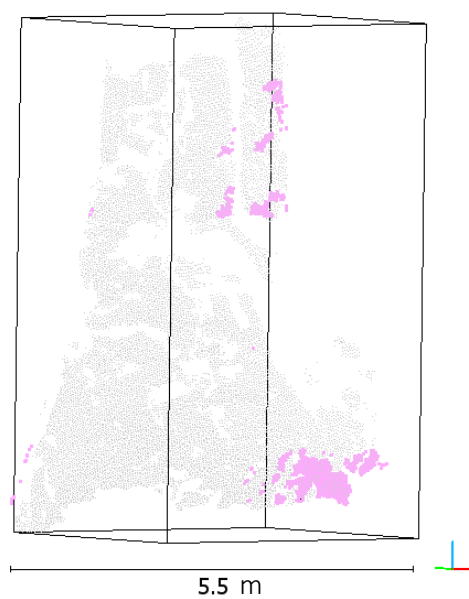
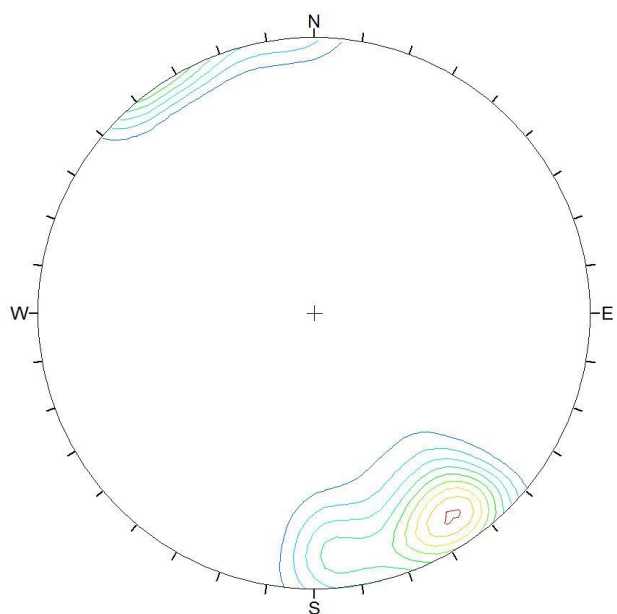
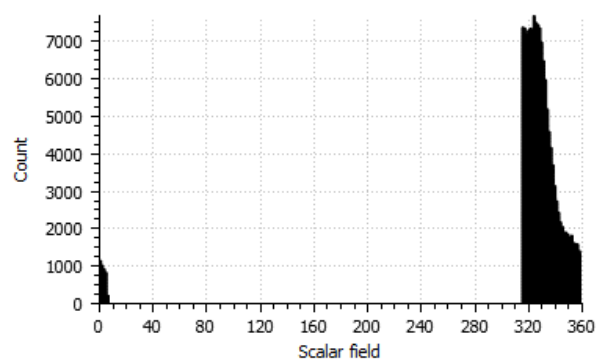
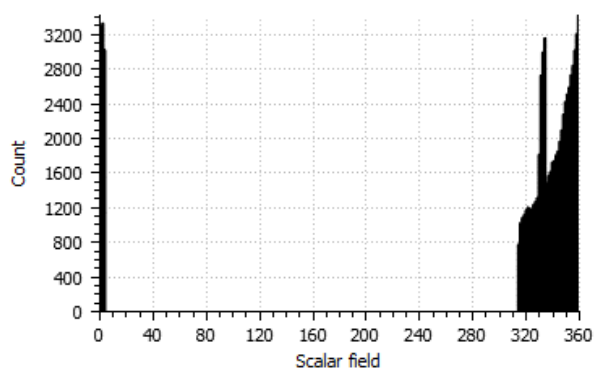






Superfícies	Orientacions	Cabussaments	Superfícies	Distribució	Cabussaments
Agrupació 6a	000° a 006°	70° a 90°	Agrupació 6b	315° a 360°	70° a 90°

Família	Orientació més freqüent	Cabussament mitjà	Número de punts
Família 6 (Zona A)	358°	83°	73.791
Família 6 (Zona B)	324°	79°	144.530



Per poder determinar una orientació i un cabussament únic per a cada una de les 6 famílies detectades s'ha calculat el valor mig ponderat pel número de punts que conformen cada família a cada zona d'estudi, obtenint els resultats de la Taula III.2:

Taula III.2 - Orientació i cabussament i número de punts dels plans detectats.

<i>Família</i>	<i>Orientació i cabussament</i>	<i>Nombre de punts</i>
<i>Família 1</i>	196/75	552.785
<i>Família 2</i>	230/79	111.862
<i>Família 3</i>	274/81	597.755
<i>Família 4</i>	054/80	103.025
<i>Família 5</i>	147/78	248.430
<i>Família 6</i>	335/80	218.321

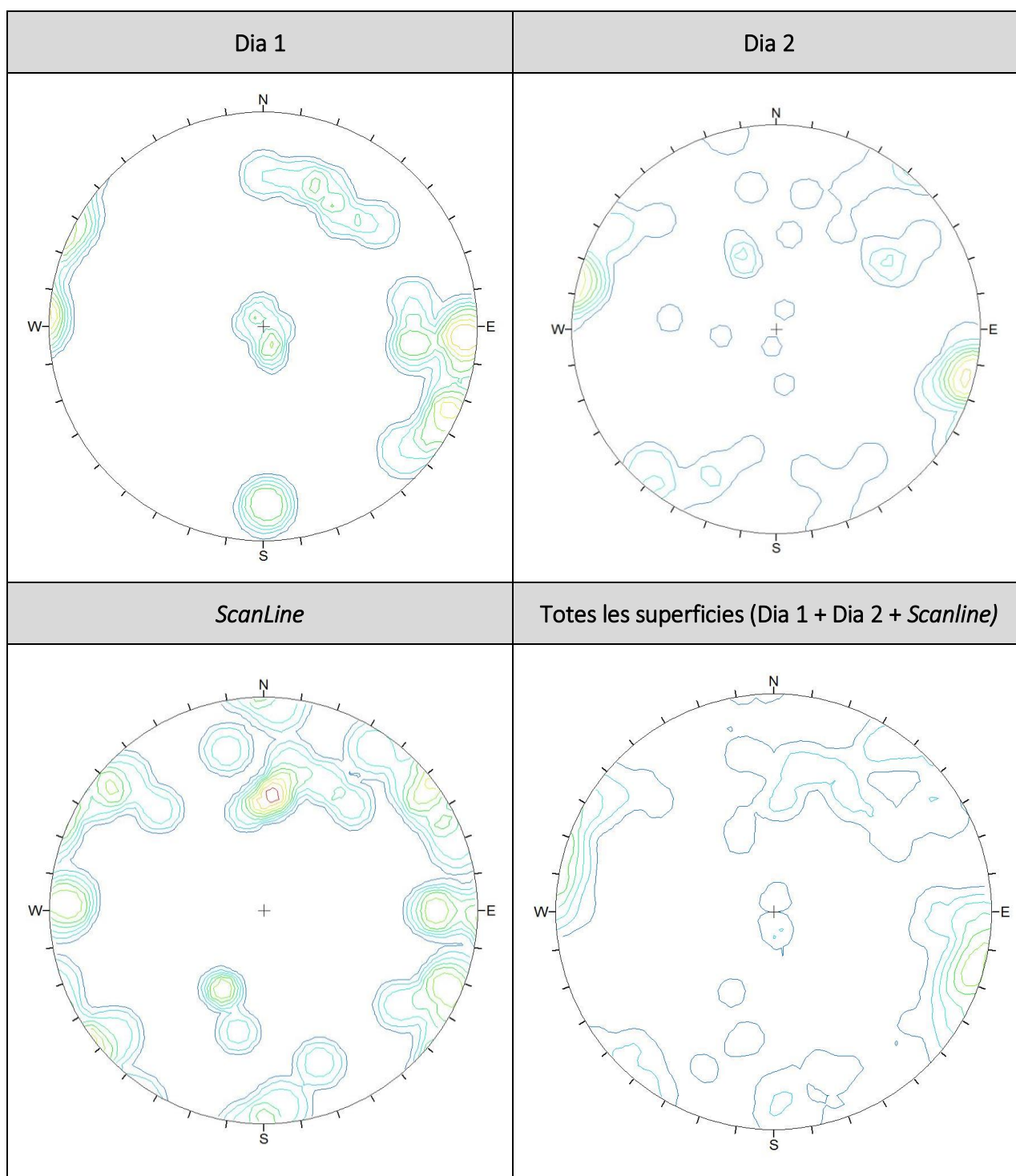
Malgrat haver-se detectat correctament mitjançant les dades LiDAR i ser una discontinuïtat que contribueix de forma important en la delimitació dels possibles blocs despresos no s'exposen els resultats de l'estratificació al no considerar-se una família de fracturació.

5.2. Detecció famílies (Dades de Camp)

Per a la realització d'aquest treball s'han realitzat tres sortides de camp, dues per compte pròpia per a realitzar un reconeixement de la zona, fer fotografies i mesurar orientacions i cabussaments de les superfícies i una tercera sortida de camp amb personal del grup RISK NAT i els tutors per a realitzar uns *scanline* en una zona representativa per tal d'obtenir a més a més de les orientacions de les superfícies l'espaiat existent.

Només s'ha pogut realitzar un *scanline* per la impossibilitat de realitzar-ne més. L'accés a l'aflorament no és possible i per aquest motiu s'han buscat llocs alternatius on poder-ne realitzar algun. La zona alternativa s'ha trobat a la vall contigua i s'ha considerat que era un lloc adient ja que es tracta de la mateixa unitat geomecànica. Tots els altres llocs que, després d'haver-se explorat, permetien realitzar un *scanline* estaven massa allunyats de la zona d'estudi, el material rocós era sensiblement diferent o les unitats estructurals que es veien no es corresponien amb les de la zona d'estudi. Per aquest motiu només es va poder realitzar un sol *scanline*.

A continuació es presenten, mitjançant la projecció estereogràfica, els plans mesurats en les diferents sortides de camp.



5.3. Comparació LiDAR / Fotogrametria

Un dels usos pels quals s'ha volgut desenvolupar el model fotogramètric de la zona d'estudi és per comparar la utilitat d'aquesta eina en la modelització estructural d'un massís i per aquest motiu s'ha seleccionat una zona on s'ha procedit a aplicar la metodologia per a la detecció de les famílies. En aquest cas, i centrant-nos, en una zona d'estudi molt concreta hem obtingut els següents resultats en l'agrupació de punts que conformen superfícies (Taula III.3).

Taula III.3 - Orientació i cabussament de les famílies detectades mitjançant el model fotogramètric

<i>Agrupació de superfícies</i>	<i>Orientacions</i>	<i>Cabussaments</i>
<i>Superfície 1</i>	006 a 034 i 170 a 211	72 a 90
<i>Superfície 2</i>	211 a 245	70 a 90
<i>Superfície 3</i>	245 a 285	40 a 90
<i>Superfície 4</i>	35 a 75	40 a 90
<i>Superfície 5</i>	134 a 170	40 a 90
<i>Superfície 6</i>	315 a 360	40 a 90
<i>Superfície 7</i>	170 a 211	40 a 72
<i>Superfície 8</i>	006 a 035	40 a 72
<i>Superfície 9</i>	075 a 110	40 a 90
<i>Superfície 10</i>	211 a 245	40 a 70

Obtenint una discretització com s'observa en la Figura III.5 de les superfícies molt més detallada que serà comentada a la discussió dels resultats.

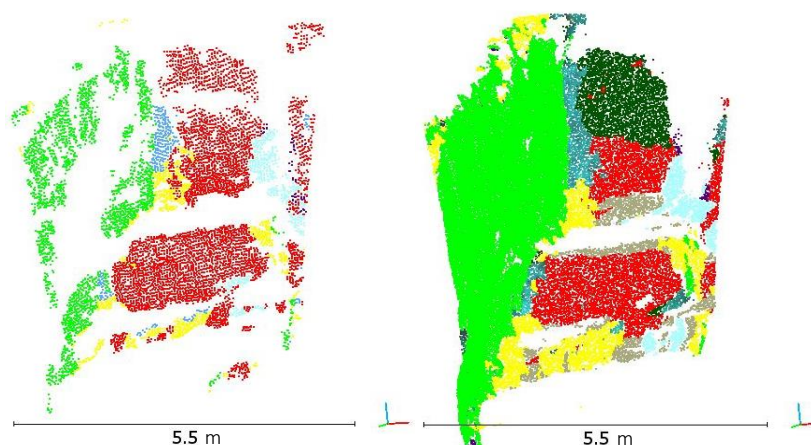


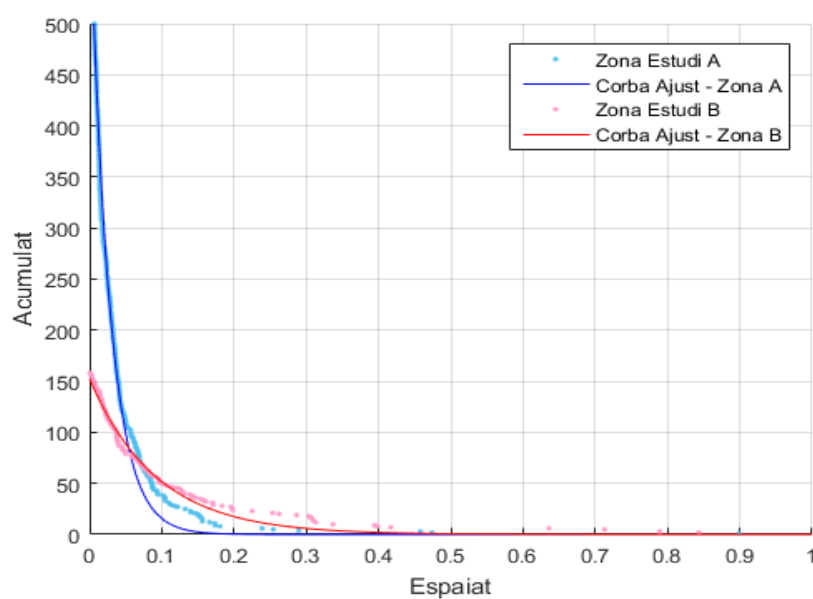
Figura III.5 - Identificació de famílies. A l'esquerra model realitzat amb LiDAR, a la dreta model realitzat amb fotogrametria. S'ha respectat el codi de colors

5.4. Càlcul d'espaiats i caracterització de les fractures

El càlcul dels espaiats ens dona com a resultat una distribució dels espaiats mínims que hi ha entre els diferents plans analitzats. Aquesta distribució es pot ajustar a una corba exponencial obtenint una equació d'ajust que caracteritza l'espaiat que hi ha entre les superfícies seleccionades amb la mateixa orientació.

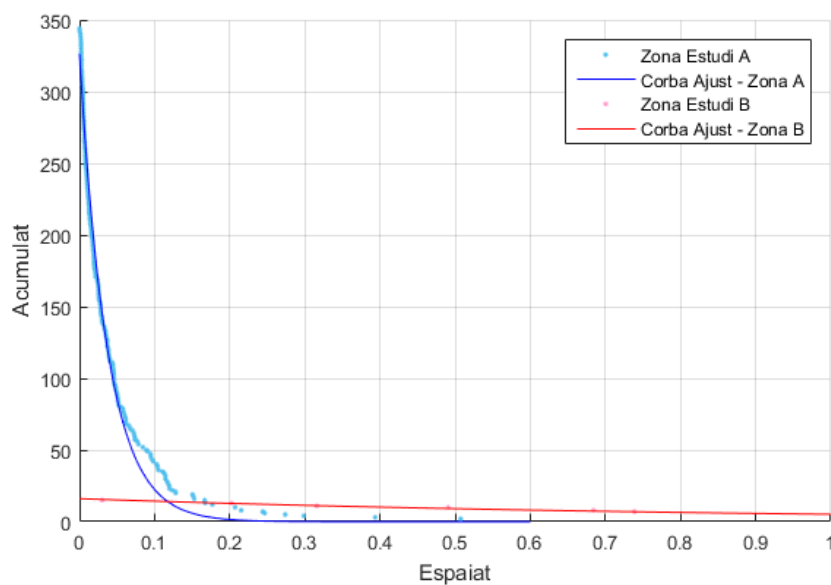
Per a les zones d'estudi A i B s'han obtingut les següents corbes d'ajust.

Família 1



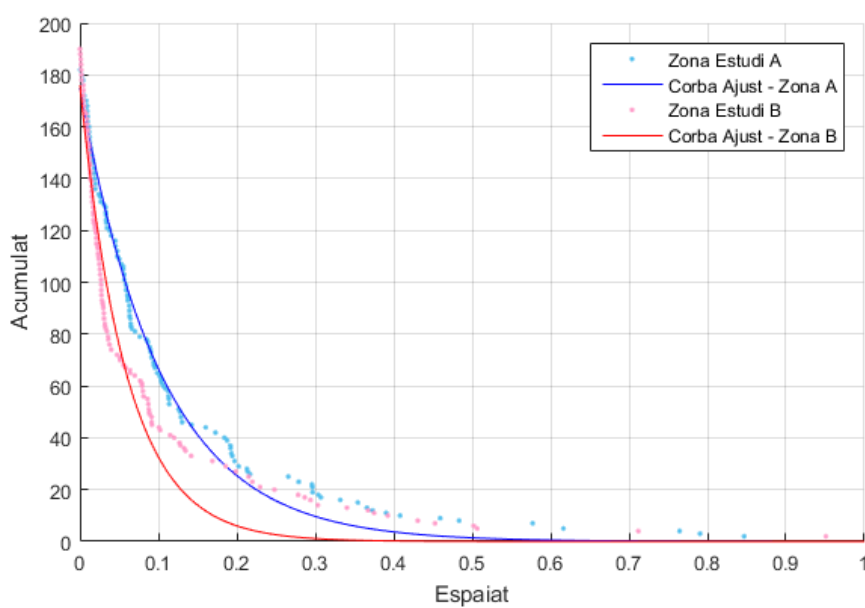
Zona A	$f(x) = 154,2 \cdot e^{-2,377 \cdot x}$	Zona B	$f(x) = 28,9 \cdot e^{-3,76 \cdot x}$
	645 superfícies ($r^2=0,9935$)		158 superfícies ($r^2=0,9826$)

Família 2



Zona A	$f(x) = 94,6 \cdot e^{-1,713 \cdot x}$	Zona B	$f(x) = 0,192,2 \cdot e^{-11,58 \cdot x}$
	344 superfícies ($r^2=0,9869$)		15 superfícies ($r^2=0,9734$)

Família 3



Zona A

$$f(x) = 43,82 \cdot e^{-1,827 \cdot x}$$

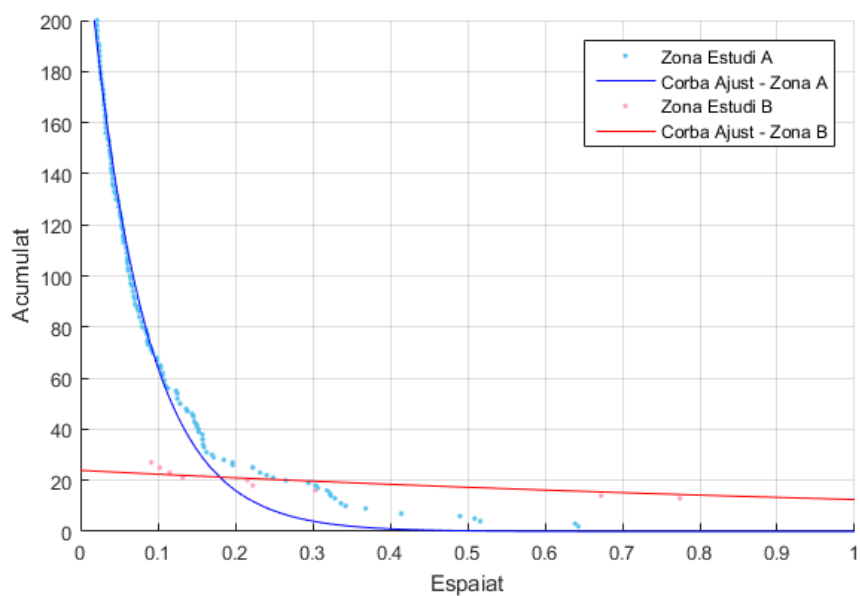
182 superfícies ($r^2=0,9888$)

Zona B

$$f(x) = 29,33 \cdot e^{-3,27 \cdot x}$$

190 superfícies ($r^2=0,9535$)

Família 4



Zona A

$$f(x) = 58,67 \cdot e^{-2,173 \cdot x}$$

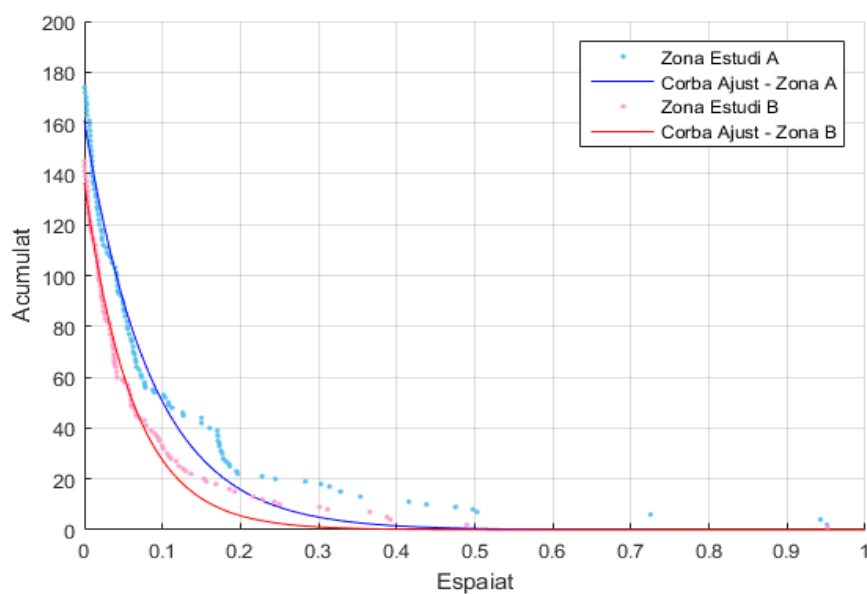
260 superfícies ($r^2=0,9938$)

Zona B

$$f(x) = 9,939 \cdot e^{-0,98 \cdot x}$$

27 superfícies ($r^2=0,9373$)

Família 5



Zona A

$$f(x) = 36 \cdot e^{-2,39 \cdot x}$$

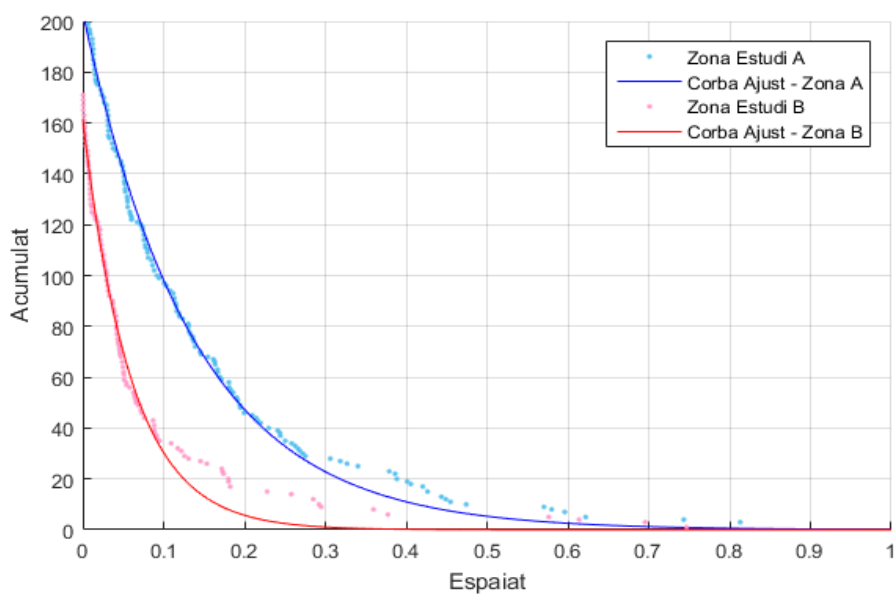
174 superfícies ($r^2=0,975$)

Zona B

$$f(x) = 33,61 \cdot e^{-2,10 \cdot x}$$

145 superfícies ($r^2=0,9854$)

Família 6



Zona A

$$f(x) = 59,88 \cdot e^{-1,499 \cdot x}$$

213 superfícies ($r^2=0,9951$)

Zona B

$$f(x) = 38,26 \cdot e^{-2,24 \cdot x}$$

171 superfícies ($r^2=0,9853$)

Amb la voluntat d'obtenir uns resultats amb sentit geològic s'ha considerat pertinent realitzar un filtrat manual de tots aquells plans que es considera que formen part d'una mateixa fractura. Aplicant aquest filtratge manual es genera una espècie d'*scanline* digital on es poden calcular espaiats (Figura III.6).

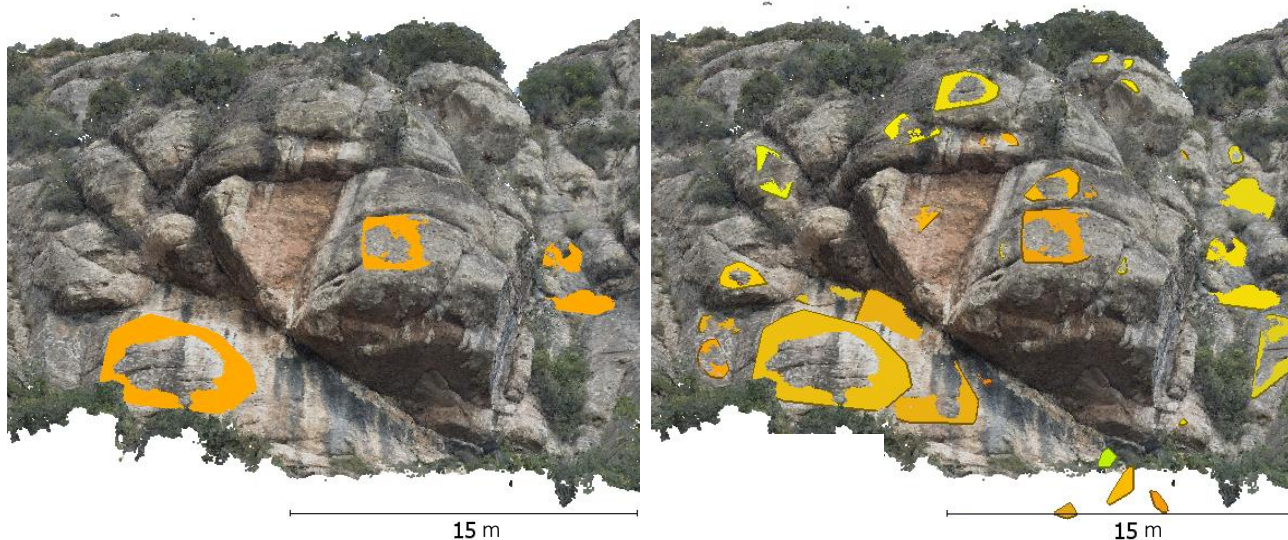


Figura III.6 – Esquerra: Plans seleccionats per a calcular els espaiats. Dreta: Plans sense filtrar

Per realitzar aquest filtratge s'ha escollit una secció de la zona d'estudi horitzontal on estan representades totes les famílies. A partir d'aquí s'han anat eliminat aquells plans que es consideraven que representaven fractures ja definides per altres plans. Obtenint finalment fractures únicament representades per un únic pla.

Al efectuar aquest filtratge podem obtenir els espaiats mínims i màxims que s'exposen en la Taula III.4.

Taula III.4 - Espaiats mínims i màxim de les fractures.

	<i>Espaiat mínim</i>	<i>Espaiat màxim</i>
Família 1	1,30 m	5,88 m
Família 2	0,88 m	1,91 m
Família 3	4,16 m	4,99 m
Família 4	5,22 m	14,25 m
Família 5	6,10 m	21,26 m
Família 6	1,56 m	6,81 m

6. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

6.1. Detecció de despreniments

A partir dels despreniments detectats es pot observar que la metodologia aplicada ha funcionat correctament. A partir del càlcul del volum i de la geolocalització de cada despreniment s'ha pogut obtenir una distribució magnitud freqüència acumulada similar a la que es detecta en altres escarpaments. Els resultats i la distribució obtinguda s'assimila a altres resultats obtinguts en treballs anteriors (Blanch, 2015).

Amb aquests resultats es demostra la capacitat dels instruments TLS per estudiar els despreniments que tenen lloc en els escarpaments. Seguint l'experiència de Royán (2015) i emprant nous algorismes de càlcul de distàncies (M3C2) com s'ha fet en aquest treball s'observa que encara queda camp per recórrer en l'ús de les dades LiDAR per a la caracterització de vessants. Intentant obtenir cada cop més despreniments, que a partir dels coneixements teòrics i l'observació, sabem s'han produït però no els detectem. En aquest cas l'ús de l'algoritme M3C2 ens ha permès baixar el llindar de detecció de despreniments permetent detectar volums més petits que alhora són els més freqüents.

Per aquest treball les dades que s'han fet servir no estaven georeferenciades en el camp amb un GPS i per aquest motiu ha calgut realitzar tot un procés d'alineació dels núvols de punts. Malgrat que aquesta alineació està prou automatitzada i que el programari s'encarrega de fer-la iterant fins a obtenir un error admissible, aquest procediment no deixa d'introduir una variable subjectiva ja que és l'usuari qui ha de determinar quan les dades estan correctament ajustades.

La posterior georeferenciació que s'ha fet en aquest treball s'ha realitzat a partir de la superposició manual de núvols de punts. Aquesta georeferenciació tot i estar ajustada s'ha de considerar aproximada perquè no s'han identificat suficients punts homòlegs entre les dades de LiDAR aeri georeferenciat de l'ICGC i les dades del LiDAR terrestre. Tot i així, es considera acceptable per als eu anàlisi.

En la gràfica de la relació magnitud-freqüència acumulada s'observa molt bé la concordança entre magnitud i freqüència habitual dels escarpaments rocosos. La presència del *rollover* ens pot estar indicant que no som capaços de detectar tots els despreniments més petits que es produeixen i la dispersió que s'observa en l'ajust de l'equació potencial ens indica que existeix una certa variabilitat en les dades. Aquests darrers fets es poden justificar per l'escassetat del període estudiat ja que només s'ha disposat de dues captures realitzades amb 6 mesos de diferència on s'han detectat 30

despreniments. Cal remarcar que si s'hagués disposat de més temps, amb esdeveniments més rellevants, la distribució s'hagués ajustat de tal manera que s'hagués assumit molt millor la variabilitat de les dades. Per ajudar a entendre el concepte és com si estiguéssim veient molt augmentada la part de la gràfica on es mostren els desprendiments petits i per tant observem molt bé les diferències que es produeixen. Per aquest motiu es considera que l'escarpament no ha quedat perfectament caracteritzat. Per a millorar la caracterització de l'escarpament seria necessari tenir més captures de dades on previsiblement trobaríem més desprendiments i de diferents magnituds que ens generarien una corba molt més harmonitzada.

Cal remarcar que com s'ha explicat a la introducció del treball, els fenòmens que succeeixen, entre ells els desprendiments, tenen magnituds molt variables. Aquest fet, relacionat amb el poc espaiat temporal entre captures fa que els resultats obtinguts no representin uns desprendiments que sí que existeixen però que no hem detectat. Tanmateix, el fet de detectar desprendiments petits mitjançant LiDAR ens permeten complementar les observacions realitzades al camp, on per la dimensió dels blocs acumulats al talús així com les grandàries de les zones de sortida de la paret, els desprendiments més petits passen desapercibuts.

6.2. Detecció de famílies

El resultats obtinguts a l'hora de caracteritzar el massís rocós mitjançant LiDAR han sigut molt positius donat que s'han pogut generar correlacions. Les famílies que s'han detectat es poden identificar també en altres estudis realitzats en el mateix massís a més a més que s'han pogut comparar amb les diferents visites a l'aflorament on a s'han pres més de 60 mesures de brúixola i inclinòmetre i les dades d'un *scanline* realitzat amb els tutors del TFG i personal del grup RISK NAT.

Taula III.5 - Comparació entre les famílies obtingudes i les famílies existents en la bibliografia.

<i>Família</i>	<i>Orientació i cabussament (LiDAR)</i>	<i>Nombre de punts</i>	<i>Royán (2013)</i>	<i>Alsaker (1996)</i>	<i>Document UB LiDAR</i>	<i>Document UB Camp</i>
<i>Família 1</i>	75/196	552.785	Família 1 (71/182)	Set E / Set C	Família 1 (86/014)	Família d (88/000)
<i>Família 2</i>	79/230	111.862	Família 2 (81/225)	Set B _{NW}		
<i>Família 3</i>	81/274	597.755	Família 3 (83/254)			
<i>Família 4</i>	80/054	103.025			Família 3 (85/065)	
<i>Família 5</i>	78/147	248.430	Família 6 (72/144)	Set A	Família 6 (83/141)	
<i>Família 6</i>	80/335	218.321		Set B _{NE}	Família 5 (80/120)	Família a (80/117)

Les famílies obtingudes s'han comparat (Taula III.5) amb altres famílies identificades en estudis realitzats amb anterioritat. Aquests estudis són els que es corresponen a Alsaker, et al. (1996) i Royán, et al. (2013). Tanmateix també s'han fet servir per a la comparació dades de documents pròpis de la UB on també s'estudiaven les orientacions de les fractures del massís de Montserrat.

En aquesta comparació s'observa que totes les famílies identificades han estat trobades amb anterioritat per altres autors. Cal posar en rellevància que algunes famílies han estat identificades en tots o gairebé tots els estudis realitzats. Aquest fet confirma que hi ha fractures que actuen de manera general i s'identifiquen arreu del massís.

Per contra, s'han obtingut famílies que no han estat identificades de manera general en tots els estudis. Aquest fet el podem atribuir a dos aspectes, el primer és que siguin famílies que no actuen de manera regional sinó local en determinades unitats geomecàniques i l'altre motiu pot ser que l'expressió d'aquestes famílies en el nostre aflorament sigui en forma de lineacions que el programari utilitzat no identifiqui, i per tant no genera el pla que les conté.

Aquest punt connecta amb l'explicació de la Figura III.7 on s'observa que al camp s'ha identificat com a mínim una família que mitjançant les dades LiDAR no s'ha detectat. Aquest fet s'atribueix, com es comentava anteriorment, a l'expressió en superfície d'aquesta família de fractures. Cal remarcar que la metodologia aplicada a partir de les dades LiDAR només és capaç d'identificar famílies que generin plans no paral·lels a la trajectoria del raig laser, ja que en aquest cas el que s'obté és una lineació i no un pla.

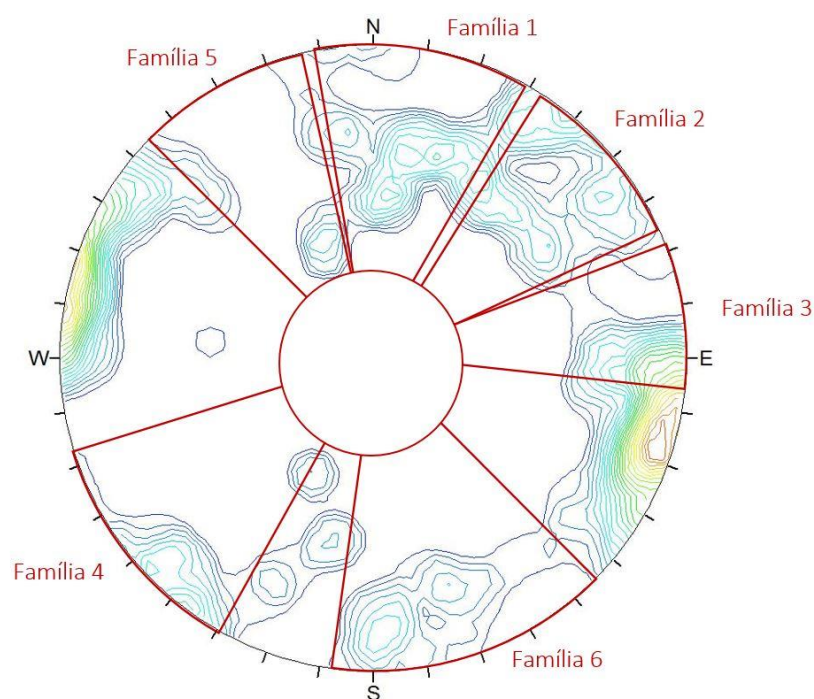


Figura III.7 - Comparativa entre les dades de camp i les dades LiDAR

Per validar els resultats obtinguts amb les dades LiDAR es pot observar que totes les famílies identificades menys la 5 també s'han detectat en les observacions de camp.

Respecte a les mesures de camp cal remarcar primerament que no s'han mesurat exactament en la zona d'estudi ja que en aquesta era impossible accedir a l'aflorament. Per aquest motiu s'han hagut de trobar zones alternatives on poder mesurar els plans. Tanmateix, en aquestes zones alternatives (que s'han buscat el més pròximes a la zona d'estudi) només s'ha pogut accedir a la part més baixa de l'aflorament, sempre a peu de camí, impossibilitant mesurar les superfícies de tota la paret.

L'estructura geològica de la muntanya de Montserrat està molt determinada per estructures horitzontals i verticals, i el fet de mesurar plans a peu de camí que transiten majoritàriament per grans estructures horitzontals pot fer que les dades obtingudes no siguin representatives de la realitat del massís.

A més a més, la poca quantitat de dades de camp (90 mesures en total) no fa representatiu els resultats obtinguts ja que la zona d'estudi és una zona amb un relleu molt característic controlat per les fractures però modificat per l'erosió. Aquest darrer fet fa que hi hagi superfícies molt variades combinades amb plans molt ben delimitats per les grans estructures. Existint una tendència a obtenir dades d'aquells plans més ben definits infravalorant aquells plans més petits o menys definits.

Finalment, també cal remarcar que al haver realitzat les captures LiDAR des d'un únic punt d'observació ha implicat que hi hagi famílies que hagin quedat amagades malgrat haver triat dues zones d'estudi que es consideren complementàries. Tot i així, aquest punt es discutirà més endavant amb la comparativa amb les dades obtingudes a partir del model fotogramètric.

A l'hora de realitzar la detecció de les famílies mitjançant la informació obtinguda amb dades LiDAR hem hagut de fer front a la dificultat que suposa decidir els rangs que defineixen cada família. Montserrat és un massís que s'idealitza gairebé quadriculat degut a la presència de dues famílies ortogonals predominants però a la realitat les superfícies que s'identifiquen tendeixen a estar molt arrodonides idealitzant-se més com superfícies cilíndriques on en cada punt del cilindre podríem obtenir una superfície tangent (obtenint-ne infinites).

Per aquest motiu la identificació de famílies de discontinuïtats no es pot fer de manera sistemàtica i s'ha de fer a partir de la identificació d'un bloc el més angulós possible per a definir en una zona el rang d'orientacions que conformen una determinada superfície. També és per aquesta raó que s'obtenen rangs molt amplis d'orientacions per a una mateixa família (de l'ordre de 40° amb un

màxim de 45°) i s'obtenen famílies contínues, és a dir, on acaba una comença immediatament una altra família fent molt subjectiu els límits de cada agrupació.

A més a més, la identificació amb dades LiDAR permet una resolució centimètrica fent que molts cops les mateixes ondulacions de les fractures s'identifiquin com punts amb unes orientacions i cabussaments totalment diferents al de la fractura que en veritat estan representant, fent més difícil la identificació de les superfícies. Aquest tipus d'error pot ser evitat mitjançant els paràmetres del programari que computa la regressió planar però tot i que s'han fet servir valors amb la intenció d'evitar les ondulacions menors el massís de Montserrat presenta plans amb una ondulació molt major a la que s'ha intentat filtrar. Haver estat més agressiu amb els paràmetres hagués comportat, per altra banda, eliminar superfícies més petites o menys representades amb punts.

Finalment, el cabussament molt vertical de la majoria de les superfícies de Montserrat fa que en algunes superfícies hi hagi punts que es poden computar amb una direcció de cabussament o amb la seva conjugada ($\pm 180^\circ$) aquest fet també afegeix dificultat en el moment de fer les agrupacions de les superfícies ja que cal discernir bé quan determinats punts formen part de la mateixa família o no. Aquest cas es pot veure reflectit en les famílies 1,3,4 i 6 on s'han fet servir agrupacions de superfícies conjugades però per contra l'agrupació 2a i l'agrupació 4a que podien identificar-se com la mateixa família s'ha considerat famílies diferents ja que a nivell visual s'observa com conformen estructures diferents (Figura III.8).

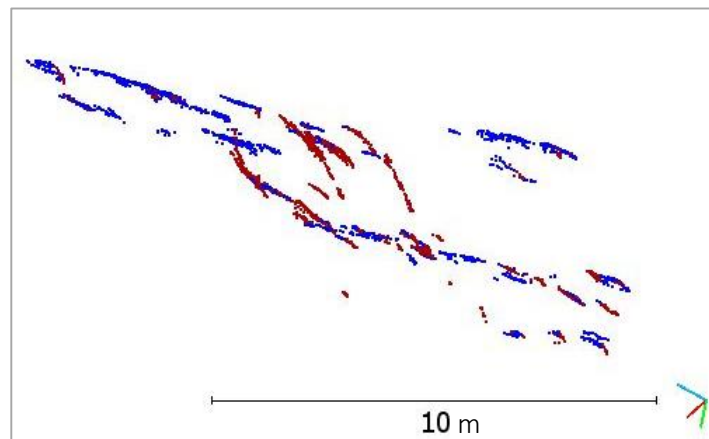


Figura III.8 - Canvi de cabussament entre l'agrupació 2a i l'agrupació 4a

En l'anàlisi de les dades LiDAR no s'ha considerat treballar amb l'estratificació ja que tot i que s'obté una superfície molt ben generada degut al seu baix cabussament no forma part de cap família de fractura i no té cap sentit incloure-la en l'objectiu final del treball que és el càlcul d'espaiats i la seva distribució.

6.3. Comparació LiDAR / Fotogrametria

En aquest treball s'ha realitzat el model fotogramètric de la zona d'estudi amb l'objectiu de veure com aquestes dades es poden adaptar a la metodologia aplicada per a l'anàlisi estructural d'un massís.

Amb els resultats obtinguts s'ha observat que les dades amb les que s'ha treballat s'adapten perfectament a la metodologia emprada, la diferència de precisió que s'obté respecte un núvol de punts LiDAR no s'ha considerat rellevant a l'hora d'identificar les famílies i en canvi la possibilitat de poder situar la càmera fotogràfica en diferents punts de la zona d'estudi (punts inaccessibles per a una captura de dades LiDAR) ens ha permès tenir un model fotogramètric que modelitza zones que en el núvol de punts LiDAR queden en ombra i per tant no es disposa d'informació.

Aquesta modelització ens ha permès aplicar en una zona d'estudi molt concreta la mateixa metodologia sobre un núvol de punts que conté més punts i que defineix millor determinades zones que en el núvol de punts LiDAR no surten representats.

Aquest fet ha comportat que a l'hora de realitzar la discretització i l'agrupació de superfícies s'hagin arribat a identificar més agrupacions susceptibles de ser famílies com s'ha mostrat en l'apartat de resultats.

Dels resultats obtinguts s'observa com per la mateixa zona d'estudi s'han identificat moltes més agrupacions de superfícies. Intentant mantenir el mateix criteri de color s'observa en el resultat obtingut de la Figura III.5 que les diferències es produeixen o bé perquè el model fotogramètric té punts que el núvol LiDAR no té o bé perquè les zones al estar més poblades es pot definir millor el canvi de cabussament. Tanmateix, la manca de correlació de totes les noves agrupacions obtingudes amb les famílies detectades en la bibliografia impliquen la necessitat de verificar el mètode per detectar quines agrupacions conformen cada família així com la necessitat de redefinir quina part del modelat del massís (i per tant dels plans detectats) està relacionada amb les fractures i quina correspon a processos erosius.

Observant la mateixa Figura III.5 podem veure com les diferències no apareixen per obtenir unes orientacions diferents (el canvi lateral de colors està marcat gairebé igual) sinó per poder discriminar millor els cabussaments.

Aquestes diferències en el canvi de cabussament estan directament relacionades amb la possibilitat de poder tenir visuals diferents des de l'aparell (LiDAR o càmera fotogràfica) i la paret a estudiar. En

el nostre cas, al tenir situat el LiDAR en un punt inferior i capturar en contrapicat molts canvis de cabussament queden amagats per no poder tenir visual.

Per obtenir aquests resultats s'ha de fer un model fotogramètric amb la màxima qualitat fet que comporta estudiar prèviament les captures fotogràfiques que es faran, editar els fitxers, seleccionar els elements on volem trobar punts homòlegs (evitant zones de confusió) i modelitzar amb la màxima qualitat (fet que comporta dies de processat).

Aquestes conclusions, però, no condueixen a pensar que el model fotogramètric és millor que els núvols de punts obtinguts amb dades LiDAR ja que aquest segon garanteix una resolució i una precisió que el model fotogramètric no pot assolir. (Lato, et al., 2015)

Tot i així, cal posar en rellevància que en determinades situacions on només es pot capturar dades LiDAR des d'un únic punt i per tant no es pot garantir la cobertura total de la zona des de diferents visuals la possibilitat de generar un model fotogramètric ens pot permetre no perdre informació que d'altra manera el núvol de punts LiDAR no ens garanteix.

Finalment, observant que el model fotogramètric permet obtenir un anàlisi estructural de manera ràpida i econòmica (perdent la precisió de les dades LiDAR) obre possibilitats a plantejar nous usos en determinades situacions on es prioritzi l'agilitat del model fotogramètric en front la precisió i la qualitat del LiDAR.

6.4. Càlcul d'espaiats i caracterització de les fractures

Els resultats obtinguts en el càlcul dels espaiats s'ha volgut representar mitjançant les corbes exponencials negatives que ajusten a la distribució d'espaiats. Amb la idea de que cada fractura (en un model ideal) té una única corba d'ajust que la caracteritza i la fa única independentment del lloc on es faci l'anàlisi (assumint que la fractura ideal té una distribució constant d'espaiats).

En els resultats que hem obtingut es pot veure que en determinades condicions els resultats s'apropen a la idealització plantejada inicialment. Obtenint corbes molt semblants tant si s'analitzen en la zona d'estudi A com en la zona d'estudi B. És el cas de les famílies que per la seva disposició respecte a aquestes zones d'estudi seleccionades generen plans suficients.

En canvi, en les famílies on observem que hi ha molts plans en una zona d'estudi i molts pocs en l'altra (perquè la paret té la direcció de la fractura) els resultats que s'obtenen per a cada corba no son comparables. És el cas de la família 2 i 4 on la corba d'ajust obtinguda en la zona d'estudi B no s'ha de considerar representativa.

Per obtenir aquestes corbes d'ajust s'ha hagut de fer un seguit de consideracions. El primer pas ha estat filtrar els plans. Com s'ha comentat amb anterioritat les famílies obtingudes tenen un rang d'orientacions que varia uns 40° . Aquestes variacions són considerables a l'hora de generar els plans que conformen aquests punts amb aquestes orientacions. Per aquest motiu un cop es generen tots els plans que conformen una família s'eliminen aquells plans que per estar situats en els extrems dels rangs d'orientació generen plans amb vectors normals molt diferenciats.

Un cop s'ha realitzat aquest filtre, per calcular una distància real entre dos plans s'idealitzen els plans resultants com si fossin paral·lels, calculant un vector normal mitjà a tots els plans de tal manera que el resultat obtingut està perfectament idealitzat amb plans amb la mateixa orientació i paral·lels podent així realitzar el càlcul de la distància pla – pla. Si no s'apliquessin aquests filtres els plans obtinguts no serien paral·lels i s'obtindrien infinites distàncies entre plans. Això forçaria a haver de triar una, al mateix temps que no es podria obtenir una corba característica ja que aquesta variaria depenent d'on s'hagués fet la captura de dades.

Per altra banda, les corbes reflecteixen una gran acumulació d'espaiats petits per a totes les famílies. Aquest fet està condicionat per la metodologia a l'hora de seleccionar els plans. La distància que s'ha calculat és la que correspon a la mínima entre cada pla que forma la família però cada fractura pot estar definida per diversos plans generant un càlcul redundant ja que s'estan calculant distàncies entre plans que formen part de la mateixa fractura.

L'obtenció dels plans està estretament relacionada amb els paràmetres introduïts en el programari. Si es força el programari a generar plans només on hi hagi una gran acumulació de punts s'obtindrien molts pocs plans infravalorant plans més petits i evitant tenir molts plans per fractura, per contra, (i és l'opció que s'ha triat en aquest treball) si com a requisit es selecciona un número de punts menor es caracteritzen molts més plans i en conseqüència una sola fractura està definida per molts plans.

Aquest fet es podria resoldre fàcilment introduint un filtre per la part baixa considerant que els plans que estan a determinada distància (centimètrica) siguin considerats com de la mateixa fractura. No obstant, l'observació al camp i la capacitat de tenir una alta precisió amb les dades LiDAR ens porten a plantejar-nos quins plans generen realment una fractura nova i quins no. Això passa perquè a la mateixa zona d'estudi es poden observar fractures molt rugoses que poden generar plans amb distàncies centimètriques tot i quedar associades a la mateixa fractura i fractures molt llises, tallades sovint per una estratificació molt horitzontal, que generen esglaons centimètrics i que considerem com dos plans de fractura diferents.

Per aquest motiu considerem que la informació s’ha de gestionar, sense aplicar cap filtre, i assumint que no es pot aplicar cap criteri més d’idealització de les fractures ja que per ambdós casos obtindríem distribucions d’espaiats diferents als reals (per defecte i per excés).

Aquesta metodologia però, si que ens permet obtenir els espaiats màxims i és que a partir d’un determinat espaiat ja no hi ha el dubte de si les distàncies obtingudes són entre plans d’una mateixa fractura o de fractures diferents. Per aquest motiu, la metodologia es considera vàlida i amb capacitat de determinar els espaiats màxims per exemple per determinar les dimensions màximes de futurs despresaments.

La corba d’ajust a la distribució d’espaiats genera una identificació única per a cada família de fractures que, a banda de permetre’ns directament calcular espaiats màxims i volums potencials de ser despresos, ens obre una nova finestra per seguir avançant en la caracterització de les fractures i la seva distribució geomètrica en un massís. Amb l’objectiu de discernir quins plans són els que conformen de manera individual cada fractura.

Finalment, amb la intenció de dotar de sentit geològic als resultats obtinguts s’ha volgut realitzar un *scanline* “digital” a partir dels plans obtinguts. Amb aquesta metodologia hem obtingut uns espaiats mínims i màxims que sí que tenen sentit geològic però que es distancien de qualsevol procés d’automatització ja que és l’usuari qui determina quins plans són vàlids per calcular l’espaiat i quins no. Aquest resultat el considerem també vàlid, ja que tot i perdre la idea de caracteritzar una família de discontinuïtats, amb aquesta metodologia obtenim valors d’espaiats que responen a les escales de treball de camp i per tant ens permeten realitzar models del funcionament de la fracturació del massís a escala global.

Els resultats obtinguts a l’hora de calcular els espaiats ens han situat davant d’un problema d’escala. A escala de treball del LiDAR observem que els resultats obtinguts estan influenciats per una alta concentració d’espaiats petits que considerem que no tots corresponen a espaiats reals i per altra banda a una escala de treball més general hem observat que els resultats estan directament influenciats per la determinació de l’usuari en identificar quins plans conformen part d’una fractura. Aquesta selecció tot i haver-se fet amb el suport del model fotogramètric no deixa de ser una component subjectiva aportada per l’usuari.

Els resultats obtinguts en aquest treball a l’hora de trobar els espaiats ens mostren que no existeix cap metodologia que sigui capaç de generar una reconstrucció de plans fiable i adaptada a les realitats de cada fractura fent necessària encara la intervenció de l’usuari per ajustar els

procediments. Per aquest motiu és necessari seguir cercant la combinació de metodologies que ens permetin ser capaços de discernir quins plans formen part de cada fractura i així obtenir una modelització real i automatitzada de qualsevol massís.

Finalment, tot i que no haig estat en cap moment objecte d'aquest estudi, no s'ha realitzat una correlació entre els despreniments detectats i els plans de fracturació obtinguts perquè s'ha considerat que no es disposa de suficient temps de monitoreig. Més temps d'observació hagués permès identificar despreniments associats a les fractures. A més a més, per a fer una caracterització dels despreniments adequada també cal analitzar l'extensió de les discontinuïtats, l'obertura i el rebliment d'aquestes. Elements tots ells que no s'aborden en aquest treball.

7. CONCLUSIONS I PERSPECTIVES DE FUTUR

7.1. Conclusions

Aquest estudi ha posat en rellevància l'activitat permanent de despreniments que es produeix al massís de Montserrat. En la zona d'estudi s'han detectat 30 despreniments en un període de 150 dies d'observació. Obtenint una relació de 0,2 despreniments/dia.

Els despreniments es consideren petits ja que els volums estan compresos entre $0,0039 \text{ dm}^3$ i $14,0 \text{ dm}^3$ però ens han permès fer una primera aproximació a la corba magnitud freqüència que caracteritza el massís.

Una altra part de l'estudi s'ha centrat en la identificació de les famílies de fractures que conformen el massís. En aquest apartat s'han detectat 6 famílies de fractures en la zona d'estudi que posteriorment s'han comparat amb les dades obtingudes al camp i publicades a la bibliografia per altres autors.

Tanmateix, també s'ha provat la identificació de famílies a partir d'un model fotogramètric. A diferència de les dades LiDAR el model fotogramètric ens permet una inversió econòmica menor i una major agilitat amb la contrapartida de perdre precisió i fidelitat.

Mitjançant el model fotogramètric s'han identificat 11 agrupacions de plans. Com que aquesta part de l'estudi s'ha centrat en una zona molt concreta del model no s'han comparat els resultats obtinguts amb les dades bibliogràfiques.

Finalment, la darrera part de l'estudi s'ha centrat en la identificació i el càlcul dels espaiats. En aquest apartat, aquest treball ha presentat dos resultats molt diferenciats. Per una banda es presenten les corbes d'ajust dels espaiats obtinguts per a cada pla que conforma una família i per altra banda es presenta un espaiat mínim i màxim obtingut a partir de l'anàlisi particular de cada família aplicant criteris subjectius basant-nos en les observacions que es poden realitzar a partir del model fotogramètric. Aquests darrers resultats s'han obtingut per resoldre el problema d'escala que ens planteja l'ús de dades LiDAR per al càlcul dels espaiats i per dotar de perspectiva geològica els càlculs realitzats.

7.2. Perspectives de futur

Aquest treball obre dues línies de futur molt diferenciades. La primera associada amb el càlcul dels desprendiments detectats. Les modificacions en la metodologia ens han permès identificar desprendiments de volums inferiors caracteritzant millor les corbes magnitud freqüència obtingudes. Aquestes modificacions poden ser aplicables a altres zones d'estudi on ja s'ha estat treballant amb metodologies similars. Per altra banda, mantenir els escanejos periòdics poden permetre seguir detectant desprendiments, alguns de major magnitud, ajudant a caracteritzar millor l'aflorament.

La segona línia de futur que es pot iniciar a partir d'aquest treball està relacionada amb la identificació de famílies i el càlcul dels espaiats. Tot i que la metodologia per la identificació de plans ja ha estat usada amb anterioritat, a l'hora de realitzar aquest treball hem vist com s'ha hagut d'anar idealitzant els plans per obtenir resultats calculables de manera automàtica. Seguir aprofundint en aquests aspectes poden permetre trobar fluxos de treball més acurats que permetin obtenir resultats més ajustats a la realitat. A més a més, com ja s'ha discutit en els apartats precedents, en aquest treball no s'ha arribat a determinar un valor d'espaiat calculat de manera automàtica i associable directament a un conjunt de fractures. Per aquest motiu, seguir indagant en la possibilitat de millorar la metodologia podria permetre generar nous mètodes de treball que permetin obtenir uns espaiats més ajustats a la realitat.

Altrament, un dels objectius de futur que poden sorgir d'aquest treball està relacionat amb els models fotogramètrics. Malgrat no s'hagin tractat amb profunditat per les limitacions del treball cal seguir estudiant la fiabilitat i la precisió de les dades que s'obtenen amb aquesta metodologia ja que per a determinats estudis poden resultar útils com una alternativa més econòmica i àgil al LiDAR.

Finalment, la relació entre els desprendiments i les fractures existents al massís formarien el treball de futur que permetria ajuntar els dos conceptes que s'han treballat en aquest estudi.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M. & Blanchard, J., 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, Issue 119, pp. 162-171.
- Abellán, A. et al., 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, Issue 39, pp. 80-97.
- Agisoft Photoscan, 2013. Agisoft PhotoScan User Manual Professional, Edition V1.0.0.
- Alsaker, E., Gabrielsen, R. & Roca, E., 1996. The significance of the fracture pattern of the Late-Eocene Montserrat fan-delta, Catalan Coastal Ranges (NE Spain).. *Tectonophysics*, Issue 266, pp. 465-491.
- Anadón, P. & Marzo, M., 1975. Montserrat mollassic sedimentation, a general view. *IX Congr. Int. Sedim. Nice.*, pp. 20: 41-4.
- Blanch, X., 2015. Anàlisi de l'evolució de despreniments a partir de dades LiDAR a l'escarpament de Puigcercós (Pallars Jussà).
- Brodu, N. & Lague, D., 2011. 3D Terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology.
- Chen, Y. & Medioni, G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images.. *Images Vis Comput*, Volum 10, pp. 145-155.
- Copons, R., 2008. El risc d'esllavissades a Catalunya. *RISKAT*, pp. 1-35.
- Corominas, J. & García Yagüe, A., 1997. Terminología de los movimientos de ladera. *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Volum 3, pp. 1051-1072.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. & Xu, X., 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*.
- Fisher, J. E., Shakoor, A. & Watts, C. F., 2014. Comparing discontinuity orientation data collected by terrestrial LiDAR and transit compass methods. *Engineering Geology*.
- Gal·la Requena, M., 2010. Caracterització de les zones de sortida de despreniments de la paret de Degotalls (Montserrat). *Treball Final de Carrera*.
- García-Sellés, D. et al., 2011. Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Computers & Geosciences*, pp. 1584-1594.
- Gigli, G. & Casagli, N., 2011. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, pp. 187-198.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update.. *Landslides*, Volum 11, pp. 167-194.
- ICGC, 2011. Reconeixement preliminar de la paret rocosa que domina el recinte del Monestir de Montserrat.
- Jaboyedoff, M. et al., 2010. Use of LiDAR in landslide investigation: a review. *Nat Hazards*.
- Janeras, M. et al., 2015. Using several monitoring techniques to measure the rock mass deformation in the Montserrat Massif. *International Symposium on Geohazards and Geomechanics*, Volum Conf. Series: Earth and Environmental Science 26.

- Lague, D., Brodu, N. & Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z).
- Lato, M. J. et al., 2015. Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Can. Geotech*, Volum 52, pp. 129-140.
- Lopez i Camps, J., 2009. Crònica d'una esclavissada. *Butlletí del Santuari*, Volum 83.
- López-Blanco, M., 2006. Stratigraphic and tectonosedimentary development of the Eocene Sant Llorenç del Munt and Montserrat fan-delta complexes (Southeast Ebro basin margins, Northeast Spain). *Contributions to Science*, Volum 3, pp. 125-148.
- Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F. & Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf. Process Landforms* 29, pp. 687-711.
- Martínez Rius, A., 2006. Aproximació a la geologia de Montserrat. *Muntanya*, Volum 864.
- Riquelme, A., Abellán, A. & Tomás, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, pp. 185-195.
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomas, R. & Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, pp. 38-52.
- Royán, M. J., 2015. *Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre*. Tesis doctoral ed. s.l.:s.n.
- Royán, M. J. et al., 2014. Spatio-temporal analysis of rockfall prefailure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, 11(4), pp. 697-709.
- Royán, M. J., Abellán, A. & Vilaplana, J. M., 2015. Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp (Catalonia, Spain). *Landslides*, 12(3).
- Royán, M. J., Guinau, M., Vilaplana, J. M. & Abellán, A., 2013. Análisis y seguimiento de las laderas del monasterio de Montserrat mediante LiDAR terrestre. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*.
- Santana, D., Corominas, J., Mavrouli, O. & Garcia-Sellés, D., 2012. Magnitude-frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, pp. 50-64.
- Van Den Eeckhaut, M. et al., 2007. Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region. *Earth Planet Sci. Lett.*, 256,, p. 588*603.
- Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes. *Landslides, analysis and control*, pp. 11-33.

